



Research Article

Application of Electromechanical Impedance Technique as a New Method in Determination of Concrete and Mortar Setting Times

Ramezanali Izadifard ^{1*}, Zeinab Gharianpour ²

1* -Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Received: 24 April 2024; Revised: 25 April 2024; Accepted: 27 May 2024; Published: 22 October 2024

Abstract

Concrete is composed of water, cement, aggregates, and appropriate additives, exhibiting a non-homogeneous and intricate structure. This material stands as a prevalent substance in the construction industry owing to its abundance, durability, and suitable flexibility. Concrete strength serves as one of the paramount metrics for assessing its overall quality. During the early stages and throughout the construction period, having control and a precise understanding of the strength development process is essential and crucial for safe performance that ensures time efficiency and economic optimization in the utilization of this highly consumed building material. The emergence of piezoelectric transducers, due to their properties, has aided in revolutionizing various fields such as structural health monitoring and investigating the setting process of cement materials based on non-destructive tests (NDT). The Electromechanical Impedance (EMI) method is an efficient technique based on smart sensors that examine the structural characteristics in the early ages using piezoelectric transducers (PZT) as emerging materials and solves challenges in investigating the setting process of mortar and the hydration reaction of concrete when existing conventional techniques are used. It. This article reviews the research process in this field along with the analysis of their data, and by presenting this technology, provides an inspiring context for getting to know the audience as much as possible.

Keywords: Electromechanical -impedance (EMI), Piezoelectric sensor, Concrete, Hydration process, Setting time.

Cite this article as Izadifard,R and gharianpour,Z . (2024). Application of Electromechanical Impedance Technique as a New Method in Determination of Concrete and Mortar Setting Times. (e196939). Civil and Project journal, 6(8), e196939
doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2024.459417.1296>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2024 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

کاربرد روش امیدانس الکترومکانیکی به عنوان روشی نوین در برآورد زمان گیرش بتن و ملات

رمضانعلی ایزدی فرد^{۱*}، زینب قاریان پور^۲

۱* - دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۰۵ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۰۶ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۰۷ خرداد ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ آبان ۱۴۰۳

چکیده

بتن متشکل از آب، سیمان، سنگدانه و افزودنی‌های مناسب می‌باشد و دارای ساختاری غیرهمگن و پیچیده است. این ماده به علت فراوانی، دوام و انعطاف‌پذیری مطلوب، یکی از مصالح متداول در صنعت ساخت‌وساز می‌باشد. مقاومت یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی برای سنجش کیفیت بتن است. درسین اولیه و در طول دوره‌ی ساخت، داشتن کنترل و درک درستی از روند کسب مقاومت به منظور عملکرد ایمن، امری ضروری و مهم می‌باشد، به طوری که باعث صرفه‌جویی در زمان و اقتصادی‌تر شدن استفاده از این ماده‌ی ساختمانی پرمصرف، می‌گردد. پیدایش مبدل‌های پیزوالکتریک به واسطه‌ی خواص آن‌ها، باعث شکل‌گیری تحول عظیمی در زمینه‌های مختلفی همچون نظارت بر سلامت سازه‌ها و بررسی روند گیرش مواد سیمانی بر اساس آزمایش‌های غیرمخرب شده است. روش امیدانس الکترومکانیکی (EMI) یک تکنیک کارآمد مبتنی بر حسگرهای هوشمند می‌باشد، که ضمن برطرف نمودن چالش‌های موجود در بررسی روند گیرش ملات و پیش‌روی واکنش هیدراتاسیون بتن به هنگام استفاده از تکنیک‌های مرسوم موجود، به بررسی ویژگی‌های سازه در سنین اولیه با استفاده از مبدل‌های پیزوالکتریک (PZT) به عنوان موادی نوظهور، می‌پردازد. این مقاله روند تحقیقات در این حوزه را همراه با تجزیه و تحلیل داده‌های آن‌ها مرور کرده و با مطرح کردن این تکنولوژی، زمینه‌ای الهام‌بخش را برای آشنایی هرچه بیش‌تر مخاطبان فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: امیدانس الکترومکانیکی، سنسور پیزوالکتریک، بتن، فرایند هیدراتاسیون، زمان گیرش.

۱- مقدمه

مواد سیمانی به عنوان یک ماده‌ی ساختمانی پرکاربرد، در بسیاری از جنبه‌های مهندسی عمران به کار گرفته می‌شوند (Scrivener & Kirkpatrick, 2008). فرایند هیدراتاسیون و گیرش در سنین پایین، شامل واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی پیچیده‌ای بین مواد سیمانی و آب می‌باشند، که نهایتاً منجر به ایجاد سفتی تدریجی یک مخلوط سیمانی می‌گردند. این فرایند برای مواد سیمانی مانند بتن و ملات سیمان از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا مستقیماً بر تشکیل ریزساختارها و خواص فیزیکی و مکانیکی و دوام تأثیر می‌گذارد (Zhang et al., 2012). نظارت و ارزیابی مستمر بر فرایند هیدراتاسیون و گیرش در سنین پایین، به موضوعی مهم و حیاتی، به منظور تعیین زمان مناسب برای برداشتن قالب‌ها و اجتناب از تاخیر در هر دوره از ساخت که منجر به تشکیل پیوندهای ضعیف سطحی می‌گردد، تبدیل گشته است (Lim et al., 2021). روش‌های آزمایشگاهی متعددی در تعیین مقاومت بتن، مبتنی بر نمونه‌های استاندارد مکعبی و استوانه‌ای، در کشورهای مختلف به کار می‌روند. روش‌های ارزیابی ویژگی‌های درجای بتن را می‌توان به طور کلی به سه گروه روش‌های مخرب^۱، روش‌های نیمه‌مخرب^۲ و روش‌های غیرمخرب^۳ تقسیم‌بندی نمود. هر کدام از این روش‌ها دارای طیف وسیعی از آزمایش‌ها هستند که در کنار معایب خود دارای مزیت‌های متعددی در زمینه‌ی تعیین مقاومت بتن و ارزیابی سازه‌های موجود می‌باشند. از طریق آزمایش‌های غیرمخرب می‌توان بدون برجای گذاشتن آثار تخریب بر سازه، به صورت غیرمستقیم و با استفاده از کالیبراسیون، مقاومت بتن و همچنین تغییر در خواص مصالح را نسبت به زمان اندازه‌گیری نمود (Carino, 1997). از این رو توسعه‌ی روش‌های غیرمخرب دقیق، برای تعیین و نظارت بر توسعه‌ی مقاومت بتن در سنین اولیه و اطمینان از ایمنی سازه، همچنان مورد توجه محققین بوده است، که با چالش‌های زیادی به دلیل ناهمگنی ذاتی بتن، تنوع زیاد انواع بتن با ریزساختارهای پیچیده و تغییر خواص شیمیایی و فیزیکی در طی فرایند هیدراتاسیون روبه‌رو می‌باشد. آزمایش‌های غیرمخرب، که معمولاً بیش‌تر مورد توجه قرار می‌گیرند، شامل تکنیک‌های کنترل مبتنی بر حرارت هیدراتاسیون^۴ (Grantham & Bungey, 2014)، آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک^۵ و آزمون چکش برگشتی^۶ هستند (Jaggerwal & Bajpai, 2014). روش مبتنی بر حرارت هیدراتاسیون، گرمای تولیدشده در طی واکنش شیمیایی مواد سیمانی با آب، به عنوان شاخصی برای مقاومت اندازه‌گیری می‌شود. علیرغم اینکه این روش دارای ماهیت ساده، مقرون‌به‌صرفه و معمول می‌باشد، دقت و اطمینان نسبتاً پایینی دارد.

تکنیک‌های نظارت بر سرعت پالس اولتراسونی (UPV)، از ویژگی‌های امواج مکانیکی حین عبور از محیط بتن، برای ارزیابی غیرمستقیم خصوصیات فیزیکی بتن استفاده می‌کنند (شکل ۱_الف). روش‌های اندازه‌گیری سختی سطح، به عنوان راه حلی دیگر، افزایش سختی بتن را با افزایش سن اندازه‌گیری می‌کنند، تا بتوانند روند واکنش هیدراتاسیون را از طریق آن تخمین بزنند. روش‌های دیگری نیز وجود دارند که انرژی جنبشی معینی را بر سطح بتن وارد کرده و پس از آن عرض و عمق فرورفتگی را اندازه‌گیری می‌کنند. مکانیزم آزمون چکش برگشتی، بر اساس پاسخ سطح می‌باشد (El-Mir et al., 2023). این دستگاه با اندازه‌گیری برگشت ضربه از سطح نمونه، در سطح انرژی تعریف شده، قادر به ارزیابی خاصیت الاستیک و مقاومت بتن می‌باشد (شکل ۱_ب). تحقیقات تجربی نشان دادند که همبستگی خوبی بین مقاومت فشاری و عدد برگشتی قرائت شده، وجود دارد. با این حال، این آزمایش فقط نشان‌دهنده‌ی خصوصیات بتن در نزدیکی سطح آن می‌باشد و درباره‌ی فضاها داخلی آن، اطلاعات قابل توجهی را ارائه نمی‌دهد.

¹ Destructive Testing (DT)

² Semi Destructive Testing (SNDT)

³ Nondestructive Testing (NDT)

⁴ Monitoring Concrete Hydration Temperature

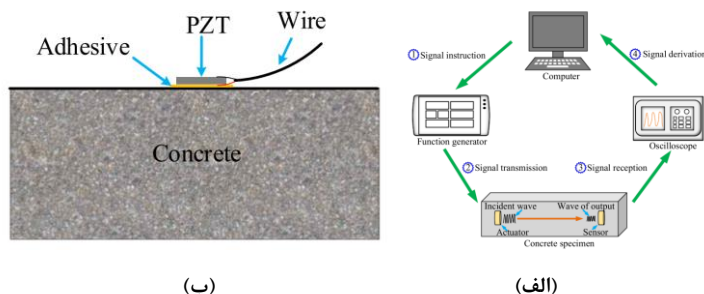
⁵ Ultrasonic Pulse Velocity

⁶ Rebound Hammer Test



شکل ۱: (الف) آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک، (ب) آزمون چکش برگشتی

روش‌های موجود به دلیل داشتن ایراداتی نظیر، اثر اجزای ماشین آلات آزمایشگاهی، آهنگ بارگذاری، ابعاد نمونه، متفاوت بودن وضعیت رطوبت و دما در حین آزمایش و حالت اجرا، اختلاف در نحوه‌ی عمل‌آوری و تغییرات در مقدار و تراکم مصالح از پیمانه‌ای به پیمانه‌ی دیگر، ارزیابی درستی را از روند کسب مقاومت در سازه و سلامت آن پس از ساخت، ارائه نمی‌دهند و نمی‌توان با اطمینان کافی، از نتایج آن‌ها در سازه‌های واقعی استفاده نمود. به منظور غلبه بر چالش‌های موجود، روش امپدانس الکترومکانیکی^۱ مبتنی بر سنسورهای پیزوالکتریک، با هدف ارزیابی روند کسب مقاومت و کنترل سلامت سازه در سنین مختلف، توسعه یافته‌است. پیزوالکتریک‌ها، مواد دی‌الکتریک ویژه‌ای هستند که از طریق اثر غیرمستقیم^۲ و مستقیم^۳ به ترتیب انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی و بالعکس، تبدیل می‌نمایند. در این روش برای ارزیابی نقاط مختلف یک سازه، از یک مبدل پیزوالکتریک به عنوان محرک و یک یا چند مبدل به عنوان حسگر استفاده می‌شود. همچنین یک مبدل پیزوالکتریک می‌تواند همزمان به عنوان حسگر و محرک، مورد استفاده قرار گیرد. در این روش قطعه‌ی محرک توسط یک آنالیزگر امپدانس تحریک شده و نهایتاً هرگونه تغییر در خصوصیات ساختار نمونه، در امپدانس الکتریکی اندازه‌گیری شده برای مبدل پیزوالکتریک حسگر، منعکس می‌شود (شکل ۲). آنالیزگر امپدانس، یک ابزار تشخیص پیشرفته است که دارای قابلیت اندازه‌گیری ظرفیت خازنی، امپدانس، ادمیتانس و سایر پارامترها می‌باشد. به عنوان کاربردهای اصلی مواد پیزوالکتریک در مهندسی عمران، می‌توان به سیستم‌های برداشت انرژی (Andriopoulou et al., 2012; Yang et al., 2017; Wang et al., 2019; Kim et al., 2011; Toprak & Tigli, 2014)، کنترل سازه، پایش سلامت سازه (Chalioris et al., 2015; Song et al., 2017)، مشاهدات مکانیکی، اندازه‌گیری تغییر شکل و سیستم‌های جداساز لرزه‌ای (Etedali et al., 2013; Lu et al., 2010) اشاره نمود. سنجش فعال، پاسخ سریع نسبت به دامنه‌های فرکانسی وسیع، هزینه‌ی کم، سادگی در اجرا و قابلیت نظارت مستقل و از راه دور، از جمله مزایای استفاده از این مبدل‌ها می‌باشند (Lim et al., 2006; Park et al., 2008; Song et al., 2008; Yang et al., 2009; Annamdas & Soh, 2010; Ihn & Chang, 2004). در این مقاله ضمن معرفی مواد پیزوالکتریک در بخش دوم، به ترتیب به تعریف برخی از پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط دستگاه آنالیزگر امپدانس مانند ادمیتانس و امپدانس الکتریکی و بررسی نحوه‌ی قرارگیری و به کارگیری مبدل‌های پیزوالکتریک در روش امپدانس الکترومکانیکی در بخش‌های سوم و چهارم می‌پردازیم. نهایتاً در بخش پنجم، بر استفاده از این روش، به عنوان جایگزینی کارآمد، در ارزیابی روند گیرش ملات و کسب مقاومت در بتن‌های مختلف، مروری خواهیم کرد.



شکل ۲: (الف) نحوه‌ی جاسازی و عملکرد پیزوالکتریک به صورت جفت داخل ساختار میزبان (ب) اتصال سطحی بین PZT و بتن (Ji et al., 2023)

¹ Electromechanical Impedance

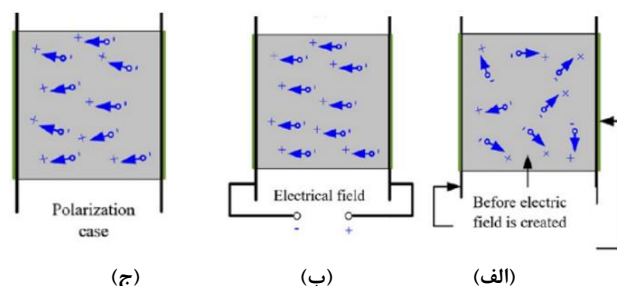
² Inverse piezoelectric effect

³ Direct piezoelectric effect

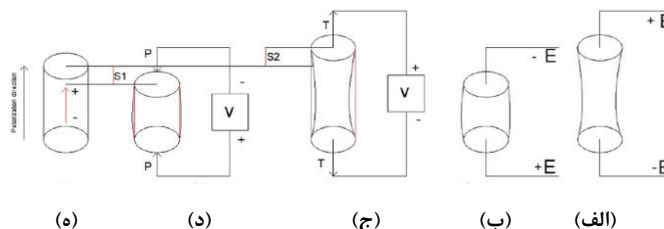
۲- مواد پیزوالکتریک

مواد پیزوالکتریک، به عنوان موادی سازگار با محیط زیست، سبک وزن و مقرون به صرفه، به دلیل توانایی بالای آن‌ها در تولید نیروی الکتریکی، زمانی که در معرض یک تنش مکانیکی قرار می‌گیرند و بالعکس، توجهات زیادی را در زمینه‌ی کاربردهای مهندسی مانند کنترل سلامت سازه، روند گیرش و کنترل ساختاری مواد کامپوزیتی ساخته شده از ملات سیمان، به خود جلب نموده‌اند. مواد پیزوالکتریک تغییر شکل و ارتعاش را در هنگام قرارگرفتن در معرض بارهای استاتیکی و دینامیکی، تشخیص می‌دهند و می‌توانند به عنوان یک حسگر^۱ و یا محرک^۲ هنگامی که تحت تاثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرند عمل کنند. همان گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، این مواد برای نشان دادن خواص یادشده، ابتدا باید قطبی شوند.

شکل‌های ۴-الف و ۴-ب، نمایانگر تولید تنش مکانیکی، با تغییر جهت میدان الکتریکی اعمالی بر این مواد، می‌باشند. همچنین شکل‌های ۴-پ، ۴-ج و ۴-د به ترتیب نشان‌دهنده‌ی خروجی ولتاژ منفی در اثر اعمال نیروی کششی، خروجی ولتاژ مثبت در اثر نیروی فشاری اعمال شده و جهت قطبی شدن این مواد هستند، که در واقع بیان‌کننده‌ی خاصیت تولید انرژی الکتریکی در پاسخ به حرکت‌های مکانیکی می‌باشند.



شکل ۳: مراحل پلاریزاسیون یا قطبی شدن مواد پیزوالکتریک: (الف) شرایط قبل از ایجاد میدان الکتریکی، (ب) اثر میدان الکتریکی، (ج) شرایط قطبش (Chen et al., 2019)



شکل ۴: رفتار مواد پیزوالکتریک: (الف) اعمال میدان الکتریکی در جهت منفی، (ب) اعمال میدان الکتریکی در جهت مثبت، (ج) اعمال کشش به عنصر، (د) اعمال فشار به عنصر، (ه) جهت پلاریزاسیون (Aydin & Çelebi, 2023)

شناخته شده‌ترین مواد پیزوسرامیک، تیتانات زیرکونات سرب^۳ و تیتانات باریم^۴ هستند. این مواد بیش‌تر در ساخت محرک‌ها و مبدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد سرامیکی برای تولید دیسک‌ها، استوانه‌ها، صفحات و یا لایه‌های نازک دلخواه به صورت پودر به کار گرفته می‌شوند. این مواد به دو دسته‌ی سخت و نرم تقسیم‌بندی می‌شوند، به طوری که نوع سخت آن می‌تواند ضربه‌های الکتریکی و تنش‌های مکانیکی بالایی را تحمل کند، بنابراین برای مولدها و مبدل‌هایی با ولتاژ و توان بالا مناسب می‌باشد. نوع نرم این مواد دارای حساسیت و ثابت دی‌الکتریک بالایی می‌باشد، با این حال، از آنجایی که ممکن است

¹ sensor

² actuator

³ Pb-Zr-Ti (PZT)

⁴ BaTiO₃

گرمایش داخلی در این مواد رخ دهد، برای استفاده در شرایط سنگین نامناسب است. PZT ها، متشکل از عناصر سرب، زیرکونات و تیتانات (Pb-Zr-Ti)، رایج‌ترین نوع تجاری این مواد بوده، که از نظر فیزیکی قوی، از نظر شیمیایی بی‌اثر، نسبتاً ارزان و دارای ثابت دی‌الکتریک بالا می‌باشند و در مقایسه با تیتانات باریم، دارای حساسیت و قابلیت دمای عملیاتی بالاتری هستند. با این حال این ماده به دلیل دارا بودن سرب، می‌تواند اثرات منفی بر محیط‌زیست داشته باشد. در شرایطی که از این مواد در زمینه‌ی نظارت بر سلامت سازه‌ها در مهندسی عمران استفاده شود، باید به پارامتر مدول یانگ PZT برای دوام، ضریب ولتاژ پیزوالکتریک بالا برای بازدهی الکتریکی و ضرایب کرنش بالا توجه نمود. دلیل استفاده از PZT به عنوان یک عنصر بسیار نازک در زمینه‌های یادشده، ظرفیت بالای آن برای تولید انرژی الکتریکی می‌باشد. به عنوان مثال PZT با کد PIC 255 و ضخامت ۰/۵ میلی‌متر، یکی از نمونه‌هایی است که بازدهی لازم را فراهم می‌کند. انواع مختلفی از مواد پیزوالکتریک وجود دارند که دارای مزایا و معایب مختلفی نسبت به یکدیگر می‌باشند. شناخته‌شده‌ترین پلیمر از جهت خواص پیزوالکتریک آن، پلی‌وینیلیدین دی‌فلوراید (PVDF) می‌باشد، که برای ساخت حسگرهای لمسی، کرنش سنسورهای ارزان قیمت و مبدل‌های صوتی سبک‌وزن مورد استفاده قرار می‌گیرد. PVDF ها نسبت به PZT ها، ارزان‌تر و غیر قابل احتراق بوده و در شرایط سخت شکسته نمی‌شوند. از آنجایی که PVDF ها را می‌توان به صورت الیافی تولید کرد، کامپوزیت بهتری با سایر مصالح ساختمانی تشکیل می‌دهند. مواد پیزوالکتریک پلیمری در مقایسه با سرامیک‌ها، از نظر مکانیکی انعطاف‌پذیر می‌باشند، بنابراین عمر طولانی‌تری دارند و مقاومت بیشتری در برابر ارتعاشات بالا نسبت به سرامیک‌ها از خود نشان می‌دهند. مواد پیزوالکتریک پلیمری را می‌توان راحت‌تر تولید نمود، به خصوص زمانی که اشکال پیچیده مورد نیاز باشند. PVDF ها به عنوان حسگر، ولتاژ و میدان الکتریکی بالاتری را در پاسخ به تنش‌های مکانیکی ایجاد می‌کنند و در مقایسه با پیزوسرامیک‌ها، ضریب ولتاژ بیشتری و ضریب پیزوالکتریک کمتری دارند. یک PZT می‌تواند همزمان در یک سازه نقش محرک و حسگر را ایفا کند، درحالی‌که PVDF ها در هر لحظه تنها می‌توانند به عنوان حسگر یا محرک مورد استفاده قرار گیرند (جدول ۱) (Aydin & Çelebi, 2023; Bischur & Schwesinger, 2012; Illgen et al., 1982; Jaitanong et al., 2014).

جدول ۱: معایب و مزایای مواد پیزوالکتریک در مقایسه با یکدیگر با استناد به مطالعه‌ی انجام‌شده توسط آیدین و همکارش (Aydin & Çelebi, 2023)

parameter	Barium titanate	Lead Zirconate titanate	PVDF
Range of frequency	0-70	0-100	0-10
Environmental impact	Affected	Affected	Affected
Negative impact on environment	No	Yes	No
Mechanical property	Rigid	Rigid	Flexible
Energy production	High	Very high	Normal
Density (g/cm ³)	6.02	6.53	1.78

۳- تکنیک امیدانس الکترومکانیکی

تکنیک امیدانس الکترومکانیکی با استفاده از وصله‌های پیزوالکتریک، جهت ارزیابی و نظارت بر سازه‌ها حتی در سنین و آسیب‌های اولیه، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تکنیک، وصله‌های پیزوالکتریک با استفاده از دستگاه‌هایی مانند LCR Meter و یا آنالیزگر امیدانس^۱ به صورت الکتریکی تحریک می‌شوند. تحریک این وصله‌ها باعث ایجاد تغییر شکل در مجاورت آن‌ها می‌شود و متعاقباً تنش ایجادشده در بتن تغییر شکل یافته، به قطعات پیزو منتقل شده و تعاملی بین ساختار نمونه و وصله‌ها شکل می‌گیرد. نهایتاً این تغییرات، در ادمیتانس اندازه‌گیری‌شده، که معیاری برای راحتی عبور جریان متناوب می‌باشد

¹ polyvinylidene difluoride

² Impedance analyser

و شامل قسمت‌های موهومی و حقیقی^۲ است، قابل مشاهده خواهد بود. نهایتاً با استفاده از خروجی‌های ذکرشده، می‌توان پارامترهای ساختاری نمونه‌ی مورد بررسی را، ارزیابی نمود. به معکوس ادمیتانس الکترومکانیکی، امپدانس الکترومکانیکی گفته می‌شود. لازم به ذکر است که بخش حقیقی پارامتر ادمیتانس، به علت داشتن اوج‌های بیش‌تر نسبت به بخش موهومی آن، بیش‌تر مورد توجه محققین به جهت بررسی آسیب‌های وارد بر سازه، قرار گرفته است. مواد پیزوالکتریک بر اثر تغییرات محیطی و یا مکانیکی، توانایی ایجاد بارهای الکتریکی را دارند و متعاقباً در اثر قرارگرفتن در معرض میدان الکتریکی، باعث ایجاد کرنش‌های مکانیکی می‌شوند (Maurya et al., 2023). در تکنیک EMI، قطعات پیزو به دو صورت مورد استفاده قرار می‌گیرند: ۱- متصل‌شده به سطح سازه‌ی سخت‌شده ۲- تعبیه‌شده در داخل ساختار نمونه‌ی مورد بررسی قبل از گیرش. برای یک سیستم مجهز شده‌ی تک بعدی^۳ می‌توان با کمک رابطه‌ی ریاضی (۱) و با استفاده از امپدانس مکانیکی ساختار مورد بررسی و وصله‌های پیزوالکتریک به کار گرفته‌شده، مقدار ادمیتانس را بدست آورد (Liang et al., 1994).

$$\bar{Y} = \left[2j\omega \frac{Wl}{h} \left(\varepsilon_{33}^T - d_{31}^2 Y_{11}^E + \frac{d_{31}^2 Y_{11}^E Z_P \tan(kl)}{Z_P + Z_S} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن Z_P و Z_S به ترتیب امپدانس وصله‌ی پیزوالکتریک و ساختار میزبان، W ، h و L به ترتیب عرض، ارتفاع و طول پیزوی مورد استفاده، ε_{33}^T ثابت دی‌الکتریک، Y_{11}^E مدول کمپلکس و d_{31} ثابت پیزوالکتریک، می‌باشند. علاوه بر آن k یا عدد موج که به صورت تابعی از فرکانس دورانی ω می‌باشد، از رابطه ریاضی (۲) قابل محاسبه خواهد بود.

$$K^2 = \frac{\omega^2 \rho}{Y_{11}^E} \quad (2)$$

۴- نحوه‌ی اتصال مبدل‌ها، قرارگیری و فاصله‌ی آن‌ها

با توجه به خواص مختلف مواد پیزوالکتریک و بتن، اتصال آن‌ها از طریق یک وسیله‌ی میانی مانند چسب و یا به کارگیری عملیاتی خاص قابل انجام می‌باشد (شکل ۵). انتخاب یک چسب مناسب و کنترل ضخامت لایه‌ی چسب برای اطمینان از اتصالی مناسب و کارآمد، امری مهم می‌باشد (Tawie & Lee, 2010; Shin et al., 2008). همچنین انتخاب یک عایق رطوبتی بهینه و ماده‌ی محافظ بیرونی، برای تعبیه کردن این مواد در بتن نیز، به عنوان موضوعی حیاتی شناخته شده است (Fan et al., 2021; Su et al., 2019). باید توجه نمود که هنگام اعمال لایه‌ی چسب، این لایه تا حد ممکن نازک بوده، درحالی‌که استحکام سطح مشترک بین PZT و بتن تضمین شود. شین و همکارانش (Shin et al., 2008)، دریافتند که شرایط اتصال اولیه‌ی وصله‌های PZT و سازه‌های بتنی، تأثیر قابل توجهی بر امپدانس خروجی دارد، به طوری که باید در انتخاب نوع چسب و زمان گیرش آن بسیار دقت شود. برخی از مطالعات نشان دادند که، وقتی لایه‌ی چسب نازک بوده و دمای محیط اطراف ساختار مورد بررسی پایدار باشد، تأثیر چسب بر ادمیتانس را می‌توان نادیده گرفت (Bhalla, 2004; Yang et al., 2008; Moharana & Bhalla, 2012). در این مطالعات فرض بر این بود که ضخامت چسب نباید از یک سوم ضخامت وصله PZT تجاوز کند.

علاوه بر این، تأثیر ضخامت چسب بر میزان ادمیتانس، با دما ارتباط نزدیکی دارد (Yang et al., 2008)، زیرا سختی چسب با افزایش دما کاهش می‌یابد و در نتیجه بر انتقال کرنش تأثیر می‌گذارد. همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، در حالتی که وصله PZT کاملاً در درون لایه‌ی محافظی مانند ملات سیمان و اپوکسی قرار داده می‌شود، ساختاری به نام سنگدانه هوشمند^۴ را ایجاد می‌کند، تا بتواند به عنوان یک ساختار محافظتی، بدون وارد شدن هر گونه آسیب به سنسور PZT، درون بتن مدفون شود. اگر ساختار PZT همراه با سیم‌های لحیم شده بر آن، کاملاً ضد آب نباشد، هنگام تعبیه شدن در یک سازه‌ی بتنی ممکن است خطای اتصال کوتاه رخ دهد و نظارت بر سازه را غیرممکن سازد. پوشش‌های ضدآب متداولی مانند رنگ آسفالت،

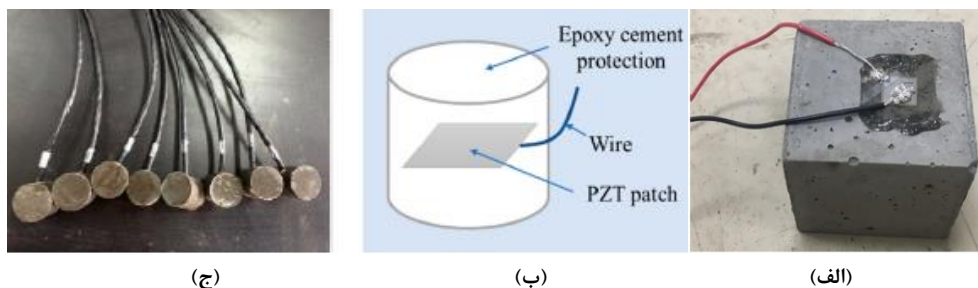
¹ SUSCEPTANCE

² CONDUCTANCE

³ Coupled system One-dimensional

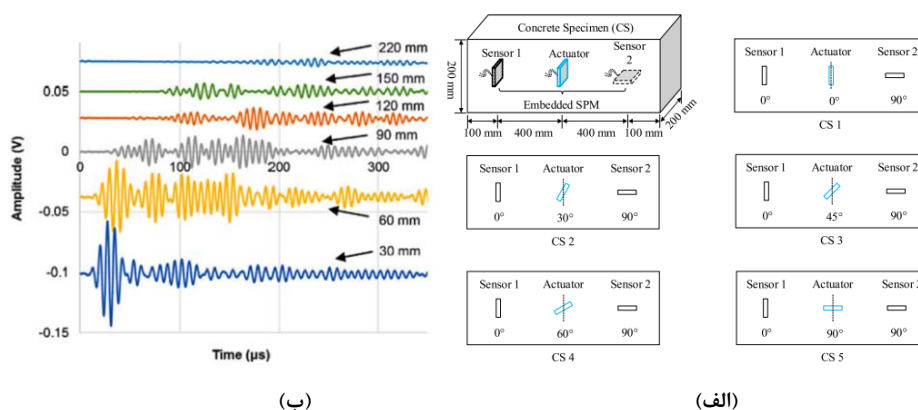
⁴ smart aggregate (SA)

سیلیکاژل، آسفالت و رزین اپوکسی وجود دارند. تحقیقات نشان دادند، از آنجایی که میرایی مواد ضد آب حدود ۱۰ برابر بتن هستند، حتی رزین اپوکسی و رنگ آسفالت که دارای اثر ضد آب بهتری می‌باشند، سیگنال‌های ادمیتانس را کاهش می‌دهند (Fan et al., 2021; Kocherla & Subramaniam, 2020; Wang et al., 2009).



شکل ۵: حالت‌های مختلف برقراری اتصال بین مواد پیزوالکتریک و بتن، الف) اتصال سنسور پیزوالکتریک به صورت سطحی، ب و ج) قرار دادن سنسور پیزوالکتریک در داخل پوششی مناسب جهت به کارگیری در سازه‌ی مورد بررسی (Liang et al., 2020; Ghafari et al., 2018)

برای مصالح بتنی، شکل موج‌هایی که مبدل‌های پیزوالکتریک می‌توانند دریافت کنند عبارتند از: موج طولی (موج P)، موج عرضی (موج S)، موج سطحی (موج R)، و موج صفحه‌ای (Kong & Song, 2016; Lim et al., 2016; Yu et al., 2020; Kijanka et al., 2015). در سنن اولیه‌ی بتن، که خمیرهای سیمان در حال سخت شدن است، دامنه‌ی امواج طولی بیش‌تر از امواج عرضی کاهش می‌یابند و تضعیف می‌شوند، درحالی‌که، وقتی خمیرهای سیمان سخت می‌شود، دامنه‌ی امواج P به سرعت افزایش می‌یابند، ولی دامنه‌ی امواج S بدون تغییر باقی می‌ماند (Kong & Song, 2016). بنابراین، امواج عرضی برای نظارت بر عملکرد و تشخیص تغییرات رخ داده در گیرش سیمان، تا ۸ ساعت اولیه مناسب هستند، درحالی‌که امواج طولی برای نظارت، پس از گذشت ۸ ساعت یعنی زمانی که بتن به تدریج در حال سخت شدن است، مناسب می‌باشند. در صورتی که ما مستلزم نصب دو یا چند مبدل باشیم، سیگنال‌های دریافت‌شده توسط آن‌ها در موقعیت‌ها، زوایا و فواصل مختلف متمایز هستند. یو و همکارانش (Yu et al., 2020)، با قرار دادن یک مبدل محرک در زوایای مختلف ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه، به بررسی اثرات زاویه‌ی قرارگیری آن‌ها بر سیگنال‌های دریافتی توسط سنسورهایی که در دو زاویه‌ی مختلف ۰ و ۹۰ درجه قرار گرفته بودند، پرداختند (شکل ۶-الف). نتایج نشان دادند که برای سنسور شماره‌ی ۱، زمانی که زاویه‌ی قرارگیری مبدل محرک کمتر از ۹۰ درجه باشد، مقدار پیک موج طولی کوچک‌تر از موج برشی خواهد بود، و هنگامی که این زاویه بیش‌تر از ۹۰ درجه باشد، مقدار پیک موج برشی بزرگ‌تر از موج طولی است. یافته‌های حسگر شماره‌ی ۲، دقیقاً برعکس حسگر شماره‌ی ۱ بودند، که دلیل آن کوچک بودن ناحیه دریافت‌کننده‌ی سیگنال موج طولی در سنسور ۱ نسبت به سنسور ۲ بود. این درحالی بود که عکس این موضوع برای موج برشی مشاهده شد. بنابراین نتایج حاکی از آن بودند که، هنگام تجزیه و تحلیل یک موج طولی، سنسورها باید در امتداد زاویه ۰ درجه مرتب شوند، درحالی‌که هنگام مشاهده موج برشی، زاویه‌ی قرارگیری سنسورها باید با زاویه‌ی مبدل محرک مطابقت داشته باشند. این مطالعه همچنین نشان داد که هرچه فاصله‌ی بین سنسور و محرک بیش‌تر باشد، سرعت انتشار و دریافت سیگنال کندتر و اتلاف انرژی بیش‌تر می‌شود و کاهش دامنه‌ی سیگنال قابل توجه‌تری رخ می‌دهد (Lim et al., 2016; Dumoulin et al., 2012; Lim et al., 2017). لیم و همکارانش (Lim et al., 2017)، فواصل مختلفی برابر با ۳۰ میلی‌متر، ۶۰ میلی‌متر، ۹۰ میلی‌متر، ۱۲۰ میلی‌متر، ۱۵۰ میلی‌متر و ۲۲۰ میلی‌متر را، بین سنسور و مبدل محرک در نظر گرفتند (شکل ۶-ب). زمانی که این فاصله از ۲۲۰ میلی‌متر تجاوز کرد، سیگنال موج ضعیف بود و موج‌های طولی و عرضی غیر قابل تشخیص بودند. درحالی‌که وقتی فاصله‌ی بین سنسور و مبدل محرک ۶۰ میلی‌متر یا کمتر بود، موج طولی و عرضی با هم همپوشانی داشتند و این موضوع پردازش داده‌ها را دشوارتر می‌کرد. بنابراین توصیه شد، حداکثر فاصله‌ی بین سنسور و مبدل محرک نباید از ۹۰ میلی‌متر تجاوز کند، درحالی‌که حداقل فاصله‌ی بین آن‌ها باید بیش‌تر از ۶۰ میلی‌متر باشد.



شکل ۶: الف) چیدمان موقعیت یابی مبدل های PZT (ب) اثر فاصله ی مبدل PZT بر دامنه ی موج (Yu et al., 2020; Lim et al., 2017)

۵- ارزیابی روند گیرش

هیدراتاسیون بتن در سنین پایین (۰ تا ۲۰ ساعت) یک واکنش شیمیایی پیچیده است که در طول آن بتن از مایع به جامد تغییر حالت می دهد. بنابراین به طور کلی سه حالت در طول فرایند هیدراتاسیون یافت می شوند: حالت مایع، حالت گذرا و حالت جامد. داشتن درک درستی از زمان گیرش، عامل مهمی در تعیین زمان مناسب برای پرداخت سطح بتن، جلوگیری از اتصال سرد، شروع عمل آوری با بخار و حذف قالب می باشد، بنابراین تشخیص دقیق آن بسیار حائز اهمیت است. در این بخش به کاربرد روش امپدانس الکترومکانیکی به عنوان روشی نوین و کارآمد، برای ارزیابی هرچه دقیق تر زمان گیرش در گستره ی وسیعی از بتن های مختلف و مقایسه ی آن با برخی از روش های موجود می پردازیم.

۵-۱ - نظارت بر فرایند هیدراتاسیون بتن مسلح شده با آرما تور

کونگ و همکارانش (Kong et al., 2013)، به بررسی خصوصیات بتن در طول فرایند هیدراتاسیون در سنین اولیه و نظارت بر روند آن، با استفاده از سنگدانه های هوشمند مبتنی بر پیزوسرامیک^۱ پرداختند. مبدل سنگدانه هوشمند^۲ (SA)، به عنوان یک ساختار ساندویچی، متشکل از دو بلوک مرمری و یا بتنی و یک وصله پیزوالکتریک از پیش لحیم شده می باشد. این سنگدانه های هوشمند، قبل از بتن ریزی، در مکان های مورد نظر در سازه های بتنی قرار داده می شوند، تا یک شبکه ی حسگر چند منظوره ی هوشمند توزیع شده را تشکیل دهند. این ساختار منجر به محافظت قابل اعتمادی از وصله های پیزوالکتریک در برابر شکستن، در طول فرایند گیرش بتن، می شود. برای اتصال این سنگدانه های هوشمند به سایر ابزار جهت تحریک، ثبت فرکانس و یا دامنه ی امواج، از رابط های BNC می توان استفاده نمود (شکل ۷). در این بررسی به جهت ساخت این سنگدانه های هوشمند از بلوک های مرمری و وصله ی زیرکونات تیتانات سرب^۴ (جدول ۲) از پیش لحیم شده، استفاده شده است. قبل از بتن ریزی، یک جفت سنگدانه ی هوشمند در فاصله ی اندکی از یکدیگر (۵۰/۸ میلی متر) بر روی میلگردها تعبیه شده بودند، به طوری که یکی از آن ها به عنوان محرک و دیگری به عنوان حسگر عمل می نمود. لازم به ذکر است که با توجه به نزدیک بودن مبدل ها، پیچیده بودن ابعاد نمونه تاثیر در جواب ها ندارد (شکل ۸).

¹ Piezoceramic

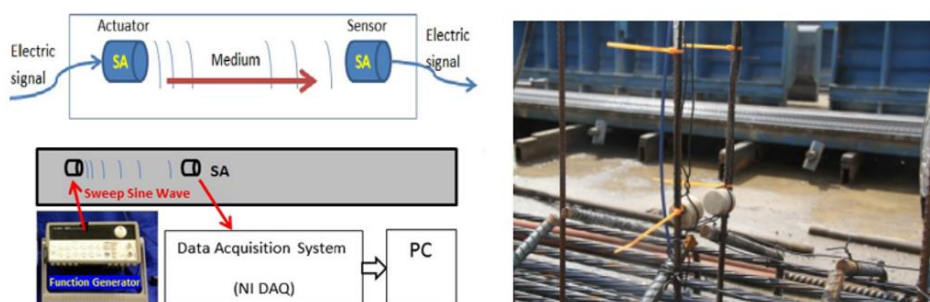
² smart aggregate

³ BNC connectors—or Bayonet Neill-Counselman

⁴ PZT



شکل ۷: ساختار سنگدانه‌ی هوشمند (SA) (Kong et al., 2013)



شکل ۸: شکل تجربی و عملی استفاده از سنگدانه‌های هوشمند مبتنی بر PZT (Kong et al., 2013)

در این مطالعه، به منظور بررسی ویژگی‌هایی از قبیل ناهمگنی، درهم‌ریختگی و پراکندگی دانه‌های بتن به خصوص در سنین ابتدایی و با هدف تحریک سنگدانه‌ی هوشمند محرک، از یک منبع (function generator Agilent 33120A) برای تولید یک موج سینوسی با فرکانس‌های متغیر (جدول ۳) و چندین موج سینوسی با فرکانس‌های ثابت ۹۰ و ۱۰۰ کیلوهرتز و در نهایت از دستگاه Data acquisition system (NIDAQ) جهت جمع‌آوری سیگنال‌های پاسخ، استفاده شده بود. در طول فرایند هیدراتاسیون، سنگدانه‌ی هوشمند تحریک‌شده، مطابق شکل ۸، امواج مافوق صوت را در محیط بتن به سمت سنگدانه‌ی هوشمند حسگر هدایت می‌کند. خواص امواج اولتراسونیک به شدت به وضعیت محیط انتقال بستگی دارند، در نتیجه هرگونه تغییر در ساختار و خواص بتن، ناشی از پیش‌روی واکنش شیمیایی پیچیده بین سیمان و آب در طول فرایند هیدراتاسیون، در دامنه و فرکانس و مشخصات دیگر امواج جمع‌آوری‌شده از سنگدانه‌ی هوشمند حسگر، بازتاب داده می‌شود و می‌توان با تجزیه و تحلیل آن‌ها در زمان‌های مختلف، سه مرحله‌ی نامبرده را در سنین اولیه در فرایند هیدراتاسیون بتن، مورد بررسی قرار داد.

جدول ۳: مشخصات موج سینوسی با فرکانس متغیر (Kong et al., 2013)

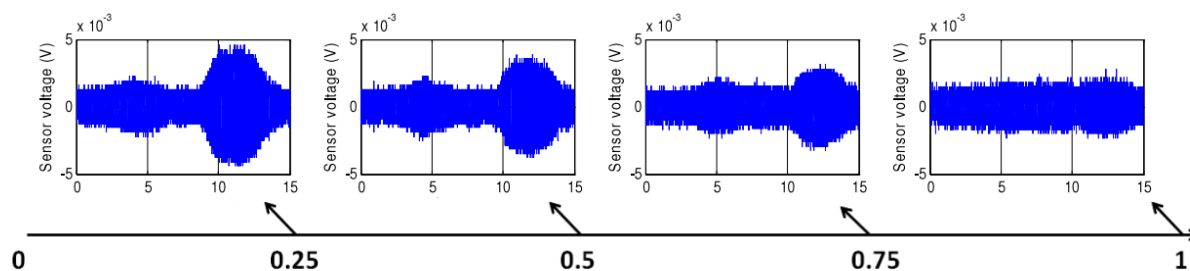
Start frequency	50 kHz
Stop frequency	100 kHz
Swept period	3 s
Amplitude	10 V

جدول ۲: مشخصات وصله PZT (Kong et al., 2013)

Young's modulus	46
Density (kg m^{-3})	7.45
d_{31}, d_{32} (pC N^{-1})	-186
d_{33} (pC N^{-1})	670
d_{15} (pC N^{-1})	660

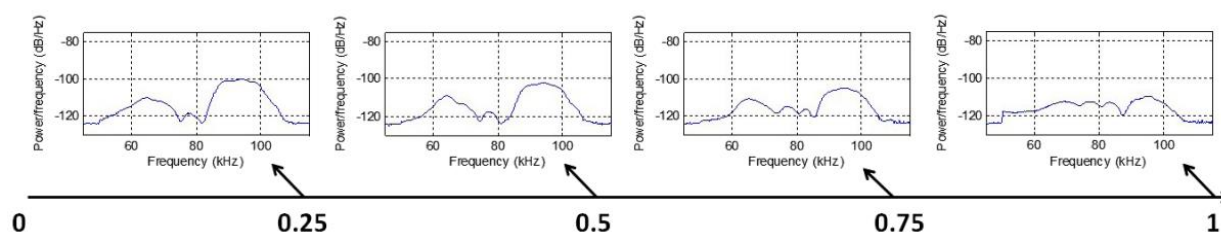
شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب پاسخ در حوزه‌ی زمان و فرکانس مربوط به مرحله‌ی سیال را، از ابتدای آزمایش تا پایان ساعت اول، در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای نشان می‌دهند، به طوری که هر نمودار نشان‌دهنده‌ی یک دوره‌ی کامل از سیگنال‌های ضبط‌شده، در اثر موج تحریکی با فرکانس متغیر می‌باشد. سیگنال‌های پاسخ، چه در حوزه‌ی زمان و چه در حوزه‌ی فرکانس که با استفاده از تبدیل فوریه بدست آمده‌اند، نشان‌دهنده پایدار و ثابت بودن فرایند هیدراتاسیون بتن در مرحله‌ی سیال می‌باشند.

دامنه‌ی این پاسخ‌ها به دلیل میرایی زیاد بتن سیال و تشکیل اولیه‌ی حباب، کمتر از ۱۰ میلی‌ولت در حوزه‌ی زمان و کمتر از ۱۰۰- دسی‌بل در حوزه‌ی فرکانس می‌باشند.



طول مدت واکنش هیدراتاسیون (ساعت)

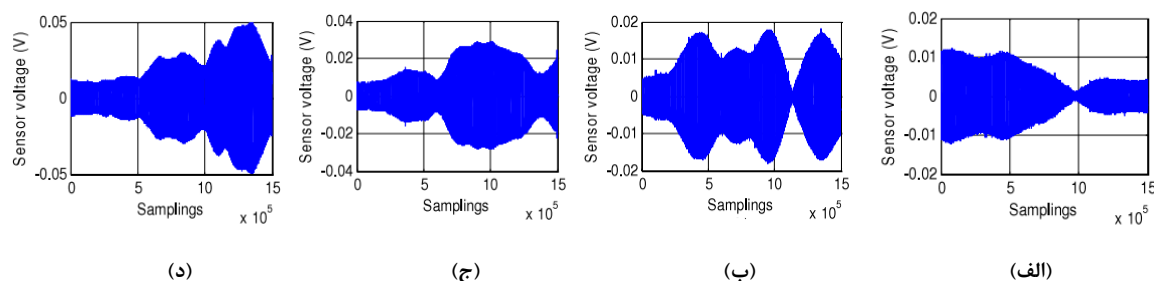
شکل ۹: پاسخ سیگنال در حوزه‌ی زمان در مرحله‌ی سیال به ترتیب از چپ به راست (Kong et al., 2013)



طول مدت واکنش هیدراتاسیون (ساعت)

شکل ۱۰: پاسخ سیگنال در حوزه‌ی فرکانس در مرحله‌ی سیال (Kong et al., 2013)

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب سیگنال‌های پاسخ در حوزه‌ی زمان و فرکانس را، در بازه‌ی زمانی ۱ ساعت تا ۷/۵ ساعت نشان می‌دهند. شکل سیگنال‌ها دائماً در حال تغییر بوده و دارای دامنه‌ی بسیار وسیع‌تری می‌باشند، که نشان‌دهنده‌ی انتشار انرژی زیاد بین دو مبدل محرک و مبدل حسگر، به دلیل انجام فرایند هیدراتاسیون، افزایش مقاومت بتن و سخت شدن آن، می‌باشد. پس از گذشت ۶ ساعت، واکنش هیدراتاسیون به ثبات نزدیک شده و سیگنال‌های ثبت‌شده، شروع به ارائه‌ی روند مشابهی می‌کنند.



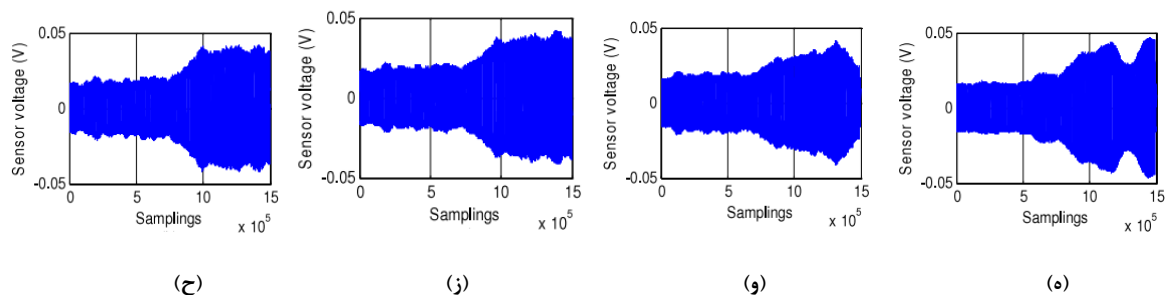
(د)

(ج)

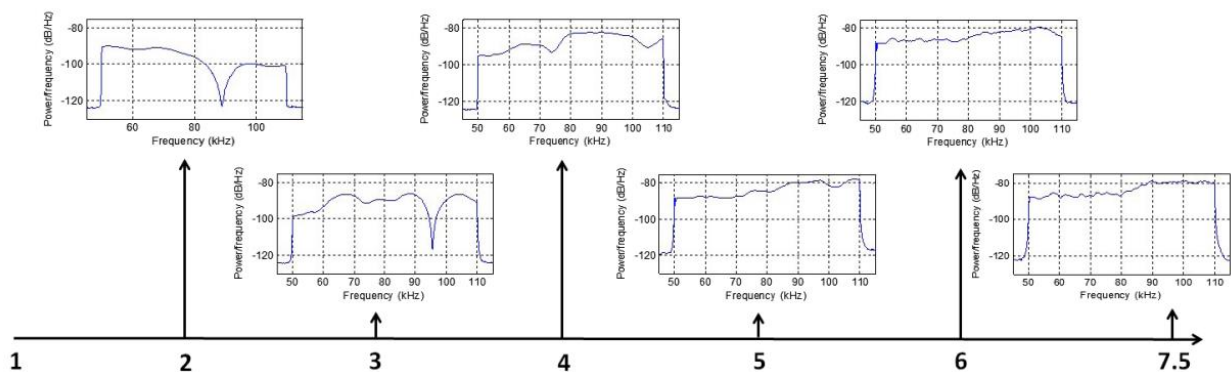
(ب)

(الف)

شکل ۱۱: سیگنال پاسخ در حوزه‌ی زمان در مرحله‌ی گذرا. الف) ۲ ساعت، ب) ۳ ساعت، ج) ۴ ساعت، د) ۴/۵ ساعت، ه) ۵ ساعت، و) ۶ ساعت، ز) ۷ ساعت، ح) ۷/۵ ساعت (Kong et al., 2013)



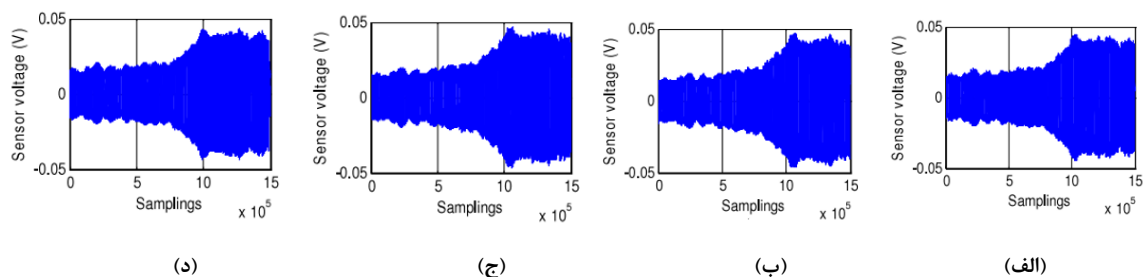
ادامه‌ی شکل ۱۱: سیگنال پاسخ در حوزه‌ی زمان در مرحله‌ی گذرا. الف) ۲ ساعت، ب) ۳ ساعت، ج) ۴ ساعت، د) ۴/۵ ساعت، ه) ۵ ساعت، و) ۶ ساعت، ز) ۷ ساعت، ح) ۷/۵ ساعت (Kong et al., 2013)



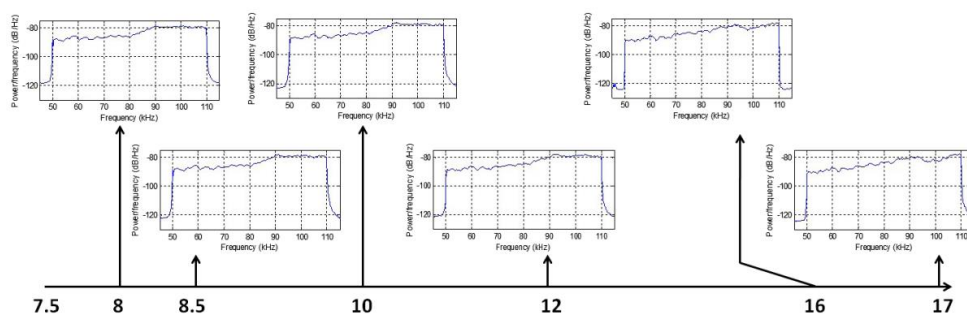
طول مدت واکنش هیدراتاسیون (ساعت)

شکل ۱۲: سیگنال‌های پاسخ در حوزه‌ی فرکانس در مرحله‌ی گذرا (Kong et al., 2013)

پس از گذشت ۷/۵ ساعت از بتن‌ریزی، که بتن به حالت جامد تبدیل شده بود، شکل سیگنال‌های ثبت‌شده به حالت پایدار درآمده و تغییر چندانی با گذشت زمان نکردند (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). لازم به ذکر است که دامنه‌ی سیگنال‌های ثبت‌شده، به دلیل سخت شدن بتن، بیش‌تر از دو مرحله‌ی قبلی افزایش یافتند. همچنین در این مطالعه به منظور نظارت بر وضعیت بتن، از دو موج سینوسی با فرکانس‌های ثابت ۹۰ و ۱۰۰ کیلوهرتز، جهت تحریک مبدل محرک استفاده شد، که نتایج سیگنال‌های ضبط‌شده در مبدل حسگر، روند تشریح‌شده با استفاده از موج سینوسی با فرکانس متغیر را، در تمام مراحل ذکرشده برای واکنش هیدراتاسیون، تایید می‌کنند (شکل ۱۵). به طوری که در مرحله‌ی اول یا مرحله‌ی سیال، دامنه‌ی سیگنال‌ها بسیار کم بودند و در مرحله‌ی دوم یا مرحله‌ی گذرا، دامنه‌ی سیگنال‌ها به طور آشفتگی افزایش پیدا می‌کردند و در نهایت، در مرحله‌ی سوم یا مرحله‌ی سخت‌شده، دامنه‌ی سیگنال‌ها با حفظ ثبات، به حداکثر مقدار خود نزدیک شده بودند.



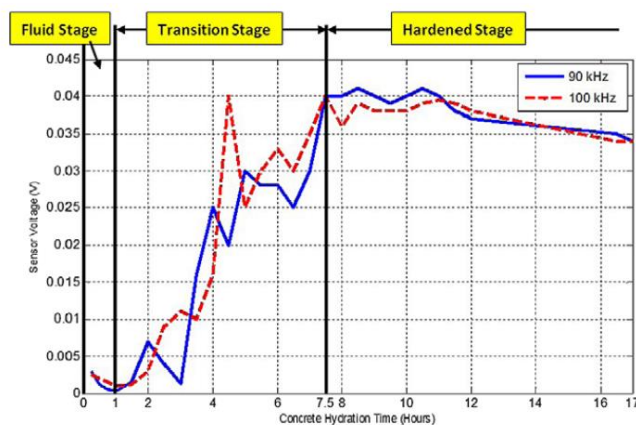
شکل ۱۳: سیگنال‌های پاسخ در حوزه‌ی زمان در مرحله‌ی سخت‌شده، الف) ۸ ساعت، ب) ۱۰ ساعت، ج) ۱۲ ساعت، د) ۱۶ ساعت (Kong et al., 2013)



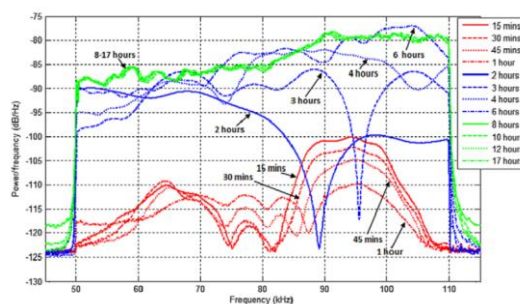
طول مدت واکنش هیدراتاسیون (ساعت)

شکل ۹۴: سیگنال‌های پاسخ در حوزه‌ی فرکانس در محله‌ی سخت‌شده (Kong et al., 2013)

شکل ۱۶، سیگنال‌های پاسخ در حوزه‌ی فرکانس را، بر اثر تحریک توسط موج سینوسی با فرکانس متغیر، در طول کل فرایند هیدراتاسیون بتن (سنین اولیه)، نشان می‌دهد. منحنی‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده‌ی سیگنال‌های پاسخ در حوزه‌ی فرکانس، در مرحله‌ی سیال (۰-۱ ساعت) می‌باشند. در این مرحله سیگنال‌ها ضعیف و دارای دو پیک فرکانسی کوچک بودند. منحنی‌های آبی رنگ نشان‌دهنده‌ی سیگنال‌های پاسخ در مرحله‌ی گذار (۵-۷، ۱ ساعت) هستند، که به دلیل دوره‌ی هیدراتاسیون گذرا، این شکل‌ها ناپایدار بودند. دامنه‌ی منحنی‌های سبز رنگ که نشان‌دهنده‌ی سیگنال‌های پاسخ در مرحله‌ی بتن سخت‌شده هستند، به حداکثر خود نزدیک شده بودند. در این مرحله به دلیل سخت شدن بتن، انتشار امواج اولتراسونیک افزایش یافته بود و منحنی‌ها از نظر شکلی به حالت پایداری رسیده بودند.



شکل ۱۰۵: سیگنال‌های پاسخ در اثر موج سینوسی با فرکانس ثابت (Kong et al., 2013)



شکل ۱۶: سیگنال‌های پاسخ در حوزه‌ی فرکانس در طول کل فرایند هیدراتاسیون (Kong et al., 2013)

۲-۵- نظارت بر فرایند هیدراتاسیون بتن حاوی ذرات شیشه‌ای باز یافتی تصفیه‌نشده

بتن یکی از پرکاربردترین مصالح در ساختمان‌سازی است، که تولید سیمان مورد استفاده در اختلاط آن، تقریباً هشت درصد از دی‌اکسیدکربن (CO_2) منتشرشده در جهان را تشکیل داده و منجر به اثرات زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری می‌شود (Rodgers, 2018). با توجه به اینکه جهان در دوره‌ی رونق ساخت‌وساز خود به سر می‌برد، دانشمندان با هدف حفظ توسعه‌ی پایدار، به دنبال یافتن جایگزین‌هایی برای به حداقل رساندن یا حتی جایگزینی سیمان و ماسه برای بتن هستند. یکی از مواد با دوام برای جایگزینی شن و ماسه، شیشه است که به طور گسترده در زندگی روزمره‌ی ما برای بسته‌بندی، ظروف غذاخوری، لوازم خانگی و خودرو استفاده می‌شود. یکی از مشکلات اختلاط شیشه با مواد سیمانی، وقوع واکنش قلیایی-سیلیکایی^۱ است، که می‌تواند باعث ورقه ورقه شدن سطح بتن و یا کاهش مقاومت آن در طی زمان شود (Sun et al., 2021). بنابراین نظارت بر توسعه‌ی مقاومت بتن در طول فرایند هیدراتاسیون و بعد از آن، امری ضروری و مهم است. همان‌گونه که پیشتر هم ذکر شده بود، آزمایش‌های مخرب و نیمه‌مخرب و غیرمخرب متعددی جهت ارزیابی بتن وجود دارند که گاهی به دلیل داشتن محدودیت‌هایی از قبیل هزینه‌ی زیاد و دقت کم و حساسیت پایین، چندان رضایت‌بخش نیستند.

چوی و همکارانش (Choi et al., 2022)، به بررسی امکان استفاده از تکنیک EMI، برای نظارت بر فرایند هیدراتاسیون بتن شیشه‌ای، با مقایسه‌ی پیک‌های فرکانس تشدید رخ داده، پرداختند. در بسیاری از کاربردهای روش امپدانس الکترومکانیکی برای مواد سیمانی، قطعات پیزوالکتریک به صورت چسبیده روی سطح سازه‌ی میزبان و یا به صورت مدفون، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مراحل اولیه‌ی هیدراتاسیون مواد سیمانی، اتصال سطحی این وصله‌ها، به دلیل اینکه سطح آن‌ها به اندازه‌ی کافی سخت نشده‌اند، امکان‌پذیر نیست، بنابراین به صورت مدفون‌شده در درون سازه‌ی میزبان، به کار گرفته می‌شوند. هنگامی که یک مبدل پیزوالکتریک به وسیله‌ی یک ولتاژ سینوسی تحریک می‌شود، ناحیه‌ی جفت‌شده با سازه، به دلیل اثر پیزوالکتریک می‌لرزد. در عین حال، این پاسخ ارتعاشی به دلیل اثر پیزوالکتریک معکوس، باعث ایجاد پاسخ الکتریکی (معمولاً جریان الکتریکی) در سنسورهای پیزوالکتریک می‌شود. نهایتاً با استفاده از سیگنال ورودی و خروجی این سنسورها، می‌توان امپدانس الکترومکانیکی را محاسبه نمود. تغییر در سختی، ناشی از پیش‌روی واکنش هیدراتاسیون مواد سیمانی که در تماس با این وصله‌ها هستند، باعث تغییر در امپدانس الکترومکانیکی اندازه‌گیری‌شده می‌شود، که می‌توان از آن برای ارزیابی درجه‌ی هیدراتاسیون استفاده نمود. در این بررسی از یک دستگاه آنالیزگر امپدانس (Hioki IM3570) جهت اعمال یک ولتاژ متناوب ۵ ولتی، در بازه‌ی فرکانسی ۵ کیلوهرتز تا ۸۸۵ کیلوهرتز به سنگدانه‌های هوشمند و ثبت ادمیتانس الکتریکی آن‌ها استفاده شده است. مطابق شکل ۱۷، به منظور محافظت کامل در برابر آب، ابتدا هر کدام از دو وصله‌ی Lead Zirconate Titanate (PZT) استفاده شده به ابعاد ۱۵×۱۵×۰/۵ میلی‌متر، با سه لایه اپوکسی در هر سمت عایق شده و سپس برای افزایش مقاومت در برابر سایش، همانند شکل در ملاتی با نسبت آب به سیمان ۰/۷ و سیمان به ماسه ۰/۳۳، تعبیه شدند. وصله‌های محافظت‌شده که با نام سنگدانه‌های هوشمند شناخته می‌شوند، قبل از استفاده در نمونه‌ی میزبان به مدت ۲۸ روز تحت عمل‌آوری قرار گرفتند.



شکل ۱۷: ساخت سنگدانه‌ی هوشمند (Choi et al., 2022)

¹ Alkali-Silica Reaction (ASR)

مقاومت مشخصه‌ی مخلوط مورد استفاده در این بررسی ۴۰ مگاپاسکال بوده و شیشه‌ی باز یافتی تصفیه‌نشده، مستقیماً در مخلوط بتن شیشه‌ای، جهت ساخت نمونه‌های منشوری به ابعاد ۷۵×۷۵×۳۰۰ میلی‌متر به کار گرفته شده بود. ۱۵ نمونه‌ی استوانه‌ای، به قطر و ارتفاعی به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر، برای انجام آزمایش مقاومت فشاری با مخلوط مورد نظر ساخته شدند. سنگدانه‌های هوشمند ساخته‌شده قبل از گیرش، در بتن تعبیه شده و نمونه‌ها بعد از گذشت ۲۴ ساعت از بتن‌ریزی، به مدت ۲۸ روز با آب عمل‌آوری شدند (شکل ۱۸).



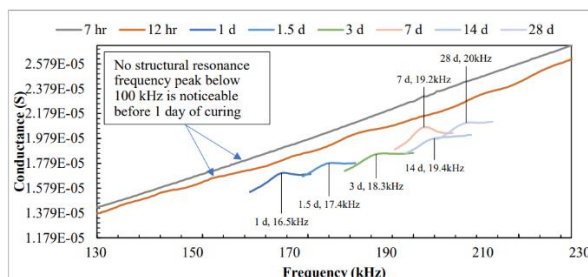
(ب)



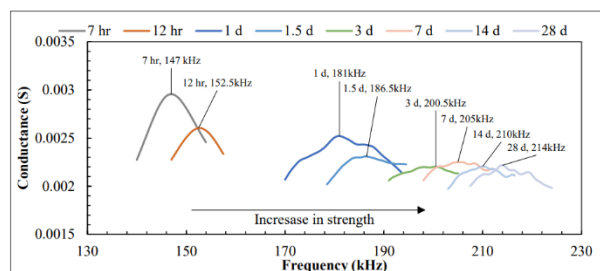
(الف)

شکل ۱۸: (الف) بتن حاوی ذرات شیشه به همراه دو مبدل تعبیه‌شده در آن به عنوان حسگر و محرک، (ب) شیشه‌ی باز یافتی (Choi et al., 2022)

مطابق شکل ۱۹، نتایج نشان‌دهنده‌ی جابه‌جایی اوج فرکانس‌های تشدید ثبت‌شده به سمت راست بودند، که دلایل آن افزایش مقاومت بتن شیشه‌ای در طول فرایند هیدراتاسیون و محدود شدن ارتعاشات مبدل‌های پیزو می‌باشند (شکل ۱۹). همچنین نتایج، همبستگی خوبی را میان نرخ تغییرات افزایش مقاومت فشاری بدست‌آمده با استفاده از روش آزمایش مقاومت فشاری سنتی و نرخ تغییرات اولین اوج فرکانس تشدید رخ داده، نشان دادند (شکل ۲۰). نرخ افزایش فرکانس تشدید در ابتدا بسیار بالا بود، که این امر نشان‌دهنده‌ی سرعت بالای واکنش هیدراتاسیون در طول مدت عمل‌آوری می‌باشد. به طوری که بعد از گذشت ۷ روز از عمل‌آوری، نرخ این تغییرات کاهش یافت. نتایج نشان دادند که علیرغم وجود شیشه در داخل بتن و احتمال وقوع واکنش قلیایی-سیلیکایی، روش EMI همچنان قادر به ثبت تغییر در استحکام، به هنگام عمل‌آوری بتن حاوی ذرات شیشه می‌باشد. همچنین پیش‌بینی شد، در صورتی که این آزمایش‌ها ادامه یابند، به دلیل حساسیت بالای این تکنیک به تشخیص واکنش قلیایی-سیلیکایی، این روش توانایی شناسایی ترک‌های داخلی و آسیب‌های ناشی از آن را دارد. در مطالعات انجام شده توسط لیم گزارش شده بود که، پیک‌های فرکانس تشدید که زیر ۱۰۰ کیلوهرتز رخ می‌دهند، در توصیف فرایند هیدراتاسیون پس از یک روز عمل‌آوری، مؤثرتر هستند (Lim, 2014). همان‌طور که در شکل ۱۹-الف مشاهده شد، بتن حاوی ذرات شیشه استحکام لازم برای اینکه سنگدانه‌های هوشمند تعبیه‌شده بتوانند فرکانس تشدید را منعکس کنند، بدست آورده است، به طوری که روند مشابهی برای فرکانس‌های تشدید ثبت‌شده در این بازه‌ی فرکانسی و پیشرفت واکنش هیدراتاسیون قابل مشاهده بود.

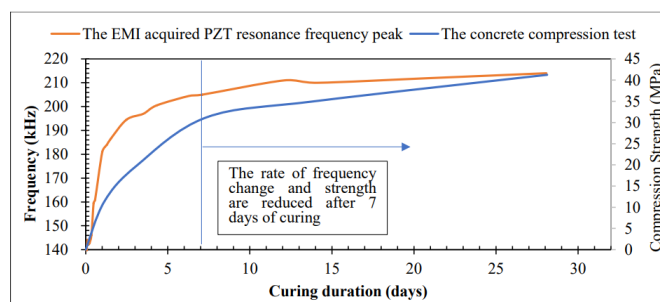


(الف)



(ب)

شکل ۱۳۹: conductance یا قسمت حقیقی ادمیتانس بدست آمده در مقابل فرکانس برای بتن حاوی ذرات شیشه در محدوده فرکانس ۱۳۰ - ۲۳۰ کیلوهرتز (Choi et al., 2022)



شکل ۲۰: اوج فرکانس تشدید بدست آمده با استفاده از تکنیک EMI و نتایج آزمایش مقاومت فشاری به روش سنتی در بتن حاوی ذرات شیشه در برابر زمان عمل آوری (Choi et al., 2022)

۳-۵- مقایسه‌ی زمان گیرش ابتدایی و انتهای ملات‌های تقویت‌شده با الیاف فولادی با استفاده از دو روش EMI و سوزن و ویکات

لی و همکارانش (Lee & Lee, 2022)، زمان گیرش اولیه و نهایی ملات‌های تقویت‌شده با الیاف فولادی^۱ را، با استفاده از مقایسه تغییرات رخ داده، در دامنه، فرکانس تشدید و امپدانس الکترومکانیکی (EMI) حسگرهای پیزوالکتریک (PZT) تعبیه‌شده، مورد بررسی قرار دادند و نتایج بررسی‌های خود را با آزمایش مقاومت در برابر نفوذ، که روشی مرسوم برای تعیین زمان گیرش ابتدایی و انتهای ترکیبات سیمانی است، مقایسه کردند. در این بررسی از سیمان پرتلند معمولی نوع یک و نسبت وزنی آب به سیمان ۵۰٪، برای ساخت نمونه‌های ملات استفاده شد، به طوری که نمونه‌های استوانه‌ای ساخته‌شده با استفاده از این مخلوط، حاوی کسرهای حجمی متفاوتی برابر با ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱٪ و ۲٪ از الیاف فولادی به طول ۳۰ میلی‌متر و مقاومت کششی‌ای برابر با ۱۱۰۰ مگاپاسکال بودند. تست‌های سوزن و ویکات^۲ (ASTM, 2013) و مقاومت نفوذ استاندارد^۳ از جمله تست‌هایی هستند که برای ارزیابی زمان گیرش مواد سیمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، که می‌توان مزایایی مانند سهولت استفاده، مناسب بودن برای استفاده‌ی درجا و آزمایشگاهی و مقرون به صرفه بودن تجهیزات را، برای آن‌ها نام برد. بدست آوردن زمان گیرش دارای ثبات، برای مواد سیمانی تقویت‌شده با الیاف، به دلیل اضافه مقاومتی که الیاف به کار گرفته‌شده در مواد سیمانی ایجاد می‌کنند، بسیار دشوار می‌باشد. برخورد سوزن و ویکات به الیاف فولادی، مقاوت در برابر نفوذ را بیش‌تر از مقدار واقعی آن نشان می‌دهد، به طوری که این مقاومت ناشی از سفت شدن و گیرش سیمان نیست، بلکه عامل مکانیکی برخورد به الیاف تاثیرگذار است. طبق استاندارد ASTM C 403، مقاومت در برابر نفوذ سوزن، با تقسیم بار اعمال‌شده در هنگام نفوذ به عمق ۲۵ میلی‌متر، بر سطح مقطع سوزن، محاسبه می‌شود. اندازه‌گیری اولیه‌ی مقاومت در برابر نفوذ ۱ ساعت پس از تماس

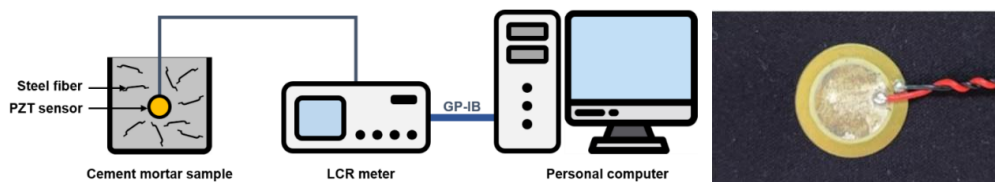
¹ steel-fiber-reinforced mortar (SRFM)

² Vicat needle test

³ penetration resistance test

سیمان و آب انجام شده و تا زمانی که مقاومت نفوذ کمتر از $\frac{3}{5}$ مگاپاسکال باشد، مقاومت نفوذ هر یک ساعت مجدداً اندازه‌گیری می‌شود. زمانی که مقدار مقاومت نفوذ از $\frac{3}{5}$ مگاپاسکال عبور کند، اندازه‌گیری‌ها هر ۳۰ دقیقه یکبار انجام می‌شوند. داده‌های مقاومت در برابر نفوذ به‌دست‌آمده در زمان‌های مختلف، با استفاده از برازش منحنی نمایی، تحت تحلیل رگرسیون قرار می‌گیرند. سپس با توجه به معادله‌ی بدست‌آمده از تحلیل رگرسیون خطی، زمان‌هایی که مقاومت نفوذ به $\frac{3}{5}$ مگاپاسکال و $\frac{27}{6}$ مگاپاسکال برسد، به ترتیب به عنوان زمان گیرش اولیه و نهایی در نظر گرفته می‌شوند (ASTM C403/C403M-16, 2016). از آنجایی که پاسخ الکترومکانیکی سنسور PZT مدفون در ملات تقویت‌شده با الیاف، به شدت تحت تاثیر مواد سیمانی‌ای که در تماس مستقیم با این سنسور قرار دارند می‌باشد، الیاف اطراف سنسور ممکن است تاثیر کمی بر پاسخ الکترومکانیکی آن داشته باشند، بنابراین می‌توان از آن به عنوان ابزاری موثر، جهت ارزیابی زمان گیرش مواد سیمانی تقویت‌شده با الیاف استفاده نمود.

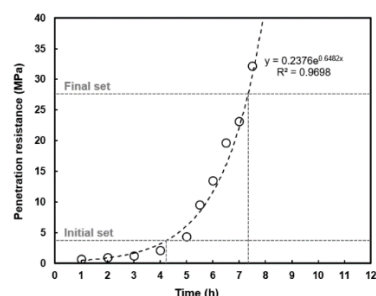
در این مطالعه، از سنسورهای (CBCG2035BAL-2) buzzer type PZT sensor که با لایه‌ی نازکی از رزین اکریلیک جهت محافظت در برابر یون‌های محلول در نمونه‌های ملات و ایجاد اتصال کوتاه، پوشانده شده‌اند، استفاده شده بود (شکل ۲۱). مطابق با شماتیک ارائه شده در شکل ۲۱، امپدانس الکترومکانیکی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه LCR meter (3235-50 LCR HiTESTER Hioki) بعد از گذشت ۲۰ دقیقه از قراردادن سنسورهای پیوز در درون ملات، تا بعد از گذشت ۱۲ ساعت، در بازه‌ی فرکانسی ۲۰ تا ۲۵۰ کیلوهرتز با گام‌های ۵۰۰ هرتز، هر ۱۰ دقیقه یکبار اندازه‌گیری شده بودند.



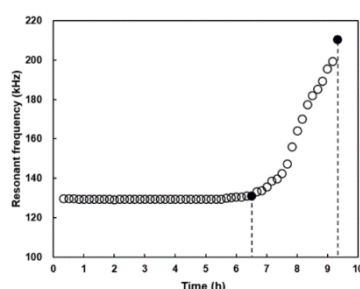
شکل ۲۱: سنسور پیوز الکتریک استفاده‌شده و شماتیک روند آزمایش برای اندازه‌گیری امپدانس الکترومکانیکی با استفاده از سنسور PZT تعبیه‌شده در ملات تقویت شده با الیاف فولادی (Lee & Lee, 2022)

زمان گیرش اولیه برای ملات ساده که حاوی هیچگونه الیافی نبود، با استفاده از تست مقاومت نفوذ و تکنیک سنجش EMI به ترتیب برابر با ۳۷۱ دقیقه و ۳۷۰ دقیقه و زمان گیرش نهایی برای این ملات، به ترتیب برای تست‌های ذکرشده برابر با ۵۷۳ دقیقه و ۵۴۰ دقیقه اندازه‌گیری شدند، به طوری که زمان‌های بدست‌آمده اختلاف زمانی حدود ۳۰ دقیقه را نشان می‌دادند. بنابراین تکنیک EMI روش مناسبی برای ارزیابی زمان گیرش ملات ساده ارزیابی شد. با توجه به اینکه نسبت مخلوط ملات ساده در SFRM‌ها به جز مقدار الیاف به کار گرفته‌شده در آن‌ها یکسان بود، انتظار می‌رفت زمان گیرش مخلوط‌های مختلف از نظر هیدراتاسیون سیمان، مقداری مشابه با ملات ساده داشته باشند. در صورتی که، هر دو زمان گیرش اولیه و نهایی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های SFRM در مقایسه با ملات ساده، با استفاده از آزمایش مقاومت در برابر نفوذ، بیش از ۲ ساعت تسريع یافته بودند (جدول ۴) (شکل ۲۲). زمانی که الیاف فولادی به کاررفته در مخلوط و سوزن ویکات در آزمایش مقاومت در برابر نفوذ، با یکدیگر برخورد داشته باشند، باعث افزایش مقاومت در برابر نفوذ خواهند شد، به طوری که هرچه میزان الیاف به کاررفته در مخلوط بیشتر باشد، این مقاومت بیش‌تر خواهد بود و زمان گیرش کمتری در این آزمایش بر اساس ASTM C 403 ثبت خواهد شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که آزمایش مقاومت در برابر نفوذ، روش مناسبی برای نمونه‌های مسلح‌شده با الیاف نیست. درحالی‌که زمان‌های گیرش اولیه و انتهایی بدست‌آمده در این بررسی با استفاده از تکنیک امپدانس الکترومکانیکی، صرف نظر از مقدار الیاف به کار گرفته‌شده، تفاوت چندانی نداشتند و تنها متکی بر میزان سختی در فاز ملاتی بودند که در تماس مستقیم با سنسورهای PZT هستند (جدول ۵). با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل ۲۴، دامنه‌ی پیک فرکانس تشدید امپدانس الکترومکانیکی، در طول زمان و تا حدود ۶ ساعت پس از بتن‌ریزی، بدون تغییر قابل توجهی در فرکانس تشدید، به کاهش خود ادامه داد و پس از آن، با گذشت زمان به ناحیه فرکانسی بالاتری منتقل شده و نهایتاً در یک نقطه‌ی زمانی خاص ناپدید شد. فرکانس پیک تشدید امپدانس الکترومکانیکی، در مرحله‌ی اولیه‌ی هیدراتاسیون ملات تغییر قابل توجهی نداشت، سپس از یک نقطه زمانی خاص شروع به افزایش کرده و نهایتاً ناپدید شد. هنگامی که سختی مواد در تماس با سنسور PZT افزایش می‌یابد،

فرکانس پیک تشدید امپدانس الکترومکانیکی به محدوده‌ی فرکانسی بالاتری می‌رود، بنابراین زمانی که در آن فرکانس پیک تشدید، شروع به افزایش می‌کند، به عنوان زمان گیرش اولیه و ۱۰ دقیقه قبل از ناپدید شدن آن، به عنوان زمان گیرش نهایی در نظر گرفته شده است (شکل ۲۳).



شکل ۱۵۲: مقاومت در برابر نفوذ به عنوان تابعی از زمان در ملات حاوی ۵٪ الیاف فولادی (Lee & Lee, 2022)



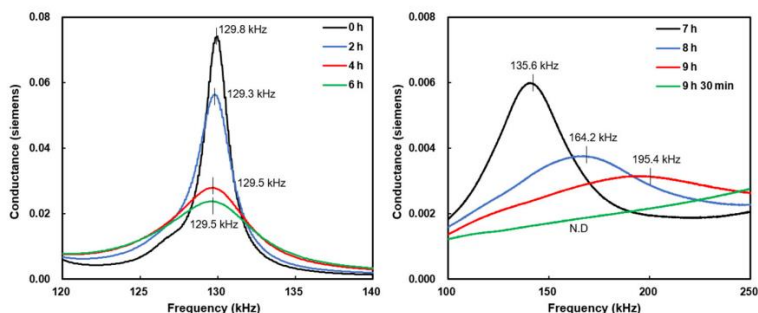
شکل ۲۳: فرکانس پیک تشدید به عنوان تابعی از سن ملات حاوی ۵٪ الیاف فولادی (Lee & Lee, 2022)

جدول ۴: زمان گیرش ابتدایی و انتهای ملات تقویت‌شده با الیاف فولادی طبق ASTM C 403 (Lee & Lee, 2022)

Sample	Initial Setting Time (min)	Final Setting Time (min)	Time Gap between the Initial Set to the Final Set (min)
Plain	371	573	202
F-0.5	249	440	191
F-1.0	213	406	193
F-2.0	172	385	213

جدول ۵: زمان گیرش ابتدایی و انتهای ملات تقویت‌شده با الیاف فولادی با استفاده از تکنیک امپدانس الکترومکانیکی (Lee & Lee, 2022)

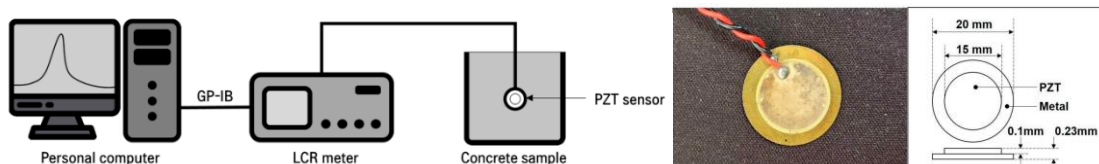
Sample	Initial Setting Time (min)	Final Setting Time (min)	Time Gap between the Initial Set to the Final Set (min)
Plain	370	540	170
F-0.5	390	560	170
F-1.0	370	530	160
F-2.0	390	560	170



شکل ۲۴: تغییر امپدانس الکترومکانیکی سنسور PZT با توجه به سن ملات حاوی ۵٪ الیاف فولادی (Lee & Lee, 2022)

۴-۵- مقایسه‌ی دو روش مقاومت در برابر نفوذ و امپدانس الکترومکانیکی در ارزیابی زمان گیرش ابتدایی و انتهای بتن حاوی سیمان پرتلند

لی (Lee, 2023)، با استفاده از تکنیک امپدانس الکترومکانیکی، مستقیماً زمان گیرش بتن را، که مخلوط پیچیده‌تری نسبت به خمیره‌ی سیمان و یا ملات می‌باشد، مورد ارزیابی قرار داد و نتایج بررسی‌های خود را با آزمایش مقاومت نفوذ استاندارد مطابق با استاندارد ASTM C 403، مقایسه نمود. آزمایش سوزن و ویکات تنها به بدست آوردن پارامترهای مربوط به گیرش خمیره‌ی سیمان محدود می‌شود (Misák et al., 2020; Kopeckó & Baranyi, 2022). همچنین تست مقاومت در برابر نفوذ، روشی است که برای اندازه‌گیری زمان گیرش ملات استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری زمان گیرش بتن با استفاده از آزمایش مقاومت در برابر نفوذ، لازم است ملات از بتن با استفاده از الک استخراج شود که انجام این کار بسیار دشوار می‌باشد، زیرا این روش زمان گیرش بتن را به طور دقیق نشان نمی‌دهد. درحالی‌که در موارد زیادی به دلیل واکنش برخی سنگدانه‌ها با سیمان، گیرش بتن با گیرش ملات متفاوت است. سیگنال‌های پاسخ ثبت‌شده از طریق سنسورهای پیزوالکتریک مدفون‌شده در داخل بتن با استفاده از تکنیک امپدانس الکترومکانیکی، تحت تأثیر تغییر سختی ناشی از هیدراتاسیون مواد سیمانی در تماس با سنسور پیزوالکتریک قرار می‌گیرند، بنابراین می‌توانند در ارزیابی زمان گیرش بتن موثر باشند. در این مطالعه جهت بررسی زمان گیرش بتن با استفاده از تکنیک EMI، از دستگاه LCR meter (Hioki, Dallas, TX, USA, 3235-50 HiTESTER) و سنسورهای پیزوالکتریک از نوع buzzer-type model CBC2035BA (جدول ۶)، استفاده شده است، که برای جلوگیری از ایجاد اتصال کوتاه، به دلیل یون‌های محلول در بتن تازه، پوشش نازکی از رزین اکریلیک بر روی سطح سنسورهای PZT اعمال شده بودند (شکل ۲۵). این سنسورها در مرکز هر سه نمونه‌ی استوانه‌ای ساخته‌شده به قطر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر، تعبیه شده بودند، که برای ساخت آن‌ها از سیمان پرتلند معمولی نوع یک، برای رسیدن به مقاومت ۲۸ روزه‌ای برابر با ۲۴ MPa، استفاده شده بود. اندازه‌گیری اولیه با استفاده از تکنیک EMI، پس از گذشت ۱ ساعت از تماس سیمان و آب و اندازه‌گیری‌های بعدی هر ۱۰ دقیقه به مدت ۱۲ ساعت انجام شد. تمام داده‌های اندازه‌گیری‌شده، با استفاده از یک کامپیوتر شخصی از طریق رابط GP-IB متصل به LCR Meter، در محدوده‌ی فرکانسی ۲۰ کیلوهرتز تا ۲۵۰ کیلوهرتز در فواصل فرکانسی ۵۰ هرتز اندازه‌گیری و ثبت شدند.



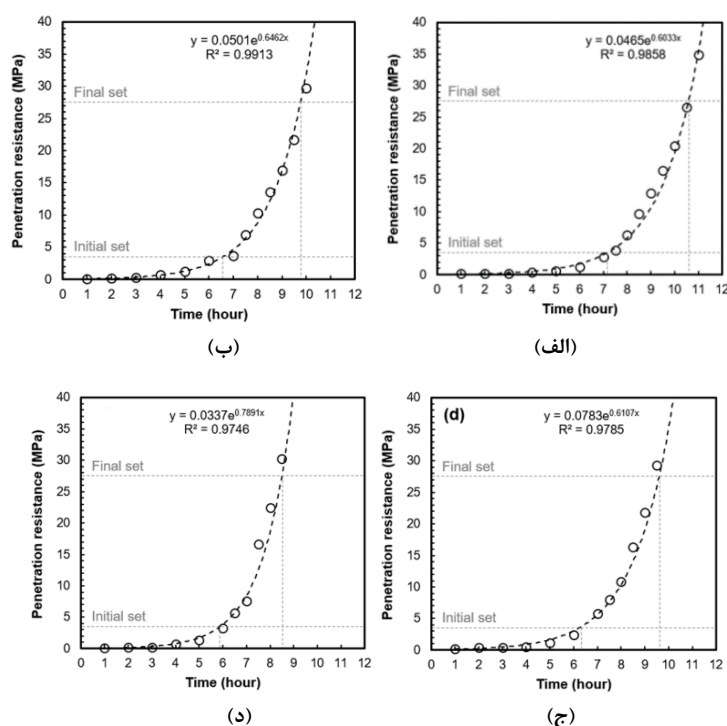
شکل ۲۵: سنسور پیزوالکتریک استفاده‌شده و تنظیمات روش EMI مبتنی بر این سنسورها (Lee, 2023)

¹ General Purpose Interface Bus

جدول ۶: مشخصات سنسور پیزوالکتریک (Lee, 2023)

Frequency (kHz)	Resonant Resistance (Ω)	Capacity (pF)	Metal
3.5 ± 0.5	350	$30,000 \pm 30$	Brass

سه نمونه‌ی استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر، از ملات استخراج‌شده از بتن به وسیله‌ی الک ۴/۷۵، جهت انجام آزمایش نفوذ استاندارد تهیه شد. علاوه بر آن، یک نمونه‌ی استوانه‌ای ملات با حذف سنگدانه‌های درشت از طرح اختلاط، تهیه گشت، تا امکان مقایسه با نمونه‌های ملات استخراج‌شده از بتن فراهم گردد. شکل ۲۶ مقاومت در برابر نفوذ نمونه‌های ملات استخراج‌شده را، به عنوان تابعی از زمان هیدراتاسیون و جدول ۷، زمان گیرش اولیه و انتهایی این نمونه‌ها را مطابق با استاندارد ASTM C 403 نشان می‌دهند. نتایج نشان دادند که، امکان بدست آوردن ملات خالص از طریق استخراج ملات از بتن با استفاده از الک وجود ندارد. زیرا ممکن است نسبت‌های آب به سیمان و سیمان به سنگدانه‌ی ریز متفاوت باشند، به طوری که تغییر در این نسبت‌ها منجر به تفاوت در زمان گیرش نمونه‌های ملات استخراج‌شده از بتن گردند.



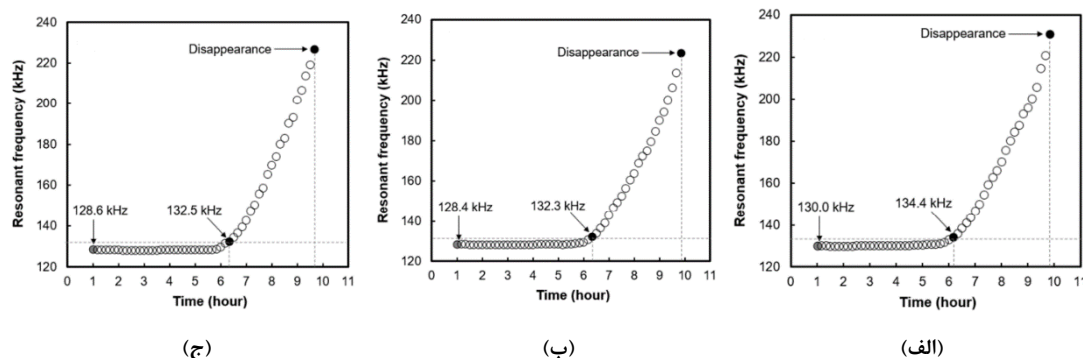
شکل ۱۷۶: مقاومت در برابر نفوذ به عنوان تابعی از سن بتن: (الف) MC1، (ب) MC2، و (ج) MC3 برای نمونه‌های ملات استخراج‌شده از بتن و (د)

ملات خالص (Lee, 2023)

جدول ۷: زمان گیرش ملات بر اساس استاندارد ASTM C 403 (Lee, 2023)

Designation		Initial Setting Time (min)	Final Setting Time (min)	Time Gap between the Initial Set and Final Set (min)
Mortar sample extracted from the same batch of concrete	MC 1	430	635	205
	MC 2	394	586	192
	MC 3	353	510	157
Pure mortar		373	576	203

شکل ۲۷ و جدول ۸، به ترتیب تغییرات فرکانس پیک تشدید^۱ را به عنوان تابعی از سن بتن، و زمان گیرش اولیه و نهایی بدست آمده با استفاده از تکنیک امپدانس الکترومکانیکی را نشان می‌دهند. فرکانس‌های تشدید هیچ تغییر قابل توجهی در مرحله‌ی اولیه‌ی هیدراتاسیون نشان ندادند، درحالی‌که در یک نقطه‌ی زمانی خاص در فرایند هیدراتاسیون، به سرعت به ناحیه‌ی فرکانسی بالا منتقل شدند و در نهایت ناپدید گشتند. هنگامی که سختی ماده‌ی در تماس با سنسور PZT افزایش می‌یابد، فرکانس پیک تشدید به سمت فرکانس‌های بالاتر تغییر می‌کند (Lee et al., 2012; Lee & Yi, 2022; Liang et al., 1997). بنابراین، زمانی‌که در آن فرکانس پیک تشدید شروع به افزایش می‌کند را می‌توان به عنوان زمان گیرش اولیه در نظر گرفت. در این بررسی زمانی که در آن، مقدار فرکانس پیک تشدید بیش از ۳٪، در مقایسه با مقدار اندازه‌گیری‌شده‌ی اولیه برای فرکانس پیک تشدید افزایش یافت، به عنوان زمان گیرش اولیه در نظر گرفته شد. اتصال بین سنسور PZT و خمیره‌ی سیمان با افزایش سختی خمیره‌ی سیمان، قوی‌تر می‌شود و باعث کاهش ارتعاش سنسور و نهایتاً ناپدید شدن فرکانس پیک تشدید می‌گردد، که می‌توان آن را به عنوان زمان گیرش نهایی لحاظ نمود. در این بررسی ۱۰ دقیقه قبل از ناپدید شدن فرکانس پیک تشدید، به عنوان زمان گیرش نهایی در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، نرخ انحراف زمان گیرش در آزمایش مقاومت در برابر نفوذ با استفاده از نمونه‌ی ملات استخراج شده از بتن، نسبت به میانگین آن‌ها، بیش از ۱۰ درصد بود، درحالی‌که نرخ انحراف زمان گیرش بتن با استفاده از تکنیک امپدانس الکترومکانیکی تا ۱/۷۷ درصد محاسبه شده بود. که این موضوع دلالت بر کارایی و پتانسیل بالای تکنیک EMI برای ارزیابی زمان گیرش بتن و همچنین قابل اعتمادتر و دقیق‌تر بودن نتایج بدست آمده با استفاده از این تکنیک، دارد.



شکل ۲۷: فرکانس پیک تشدید به عنوان تابعی از سن برای نمونه‌های بتنی با استفاده از تکنیک EMI: (الف) C1، (ب) C2 و (ج) C3 (Lee, 2023)

¹ resonant peak frequency

جدول ۸: زمان گیرش بتن با استفاده از تکنیک EMI (Lee, 2023)

Designation		Initial Setting Time (min)	Final Setting Time (min)	Time Gap between the Initial Set and Final Set (min)
Concrete sample from the same concrete batch	C 1	370	590	220
	C 2	380	590	210
	C 3	380	580	200

۶- نتیجه گیری

در این مقاله ضمن معرفی مواد پیزوالکتریک و روش امپدانس الکترومکانیکی به عنوان روشی نوین، مروری بر مطالعات انجام شده با موضوع بررسی زمان گیرش مواد سیمانی و روند واکنش هیدراتاسیون با به کارگیری این روش، صورت پذیرفته است.

- سنسورهای پیزوالکتریک به دو صورت سطحی و مدفون جهت بررسی سازه‌ها، به وسیله‌ی تحریک در حوزه‌ی فرکانسی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجا که در سنین اولیه، سطح بتن هنوز آمادگی لازم برای اتصال مناسب با مبدل‌های پیزوالکتریک را ندارد، برای ارزیابی زمان گیرش و روند واکنش هیدراتاسیون مواد سیمانی تنها می‌توان از مبدل‌های پیزوالکتریک به صورت مدفون استفاده نمود. لازم به ذکر است به منظور عایق نمودن این مبدل‌ها در برابر رطوبت و محافظت از آن‌ها در مقابل فشارهای وارده، پیش از به کارگیری آن‌ها، باید از پوشش‌های عایقی مانند رزین‌ها، اپوکسی‌ها و مواد سیمانی استفاده نمود.
- نتایج تحقیقات انجام شده و مقایسه‌ی صورت گرفته بین روش امپدانس الکترومکانیکی و تکنیک‌های موجود مانند روش مقاومت در برابر نفوذ، نشان دادند که روش امپدانس الکترومکانیکی ضمن رفع برخی از چالش‌های موجود، روش امیدوار کننده‌ای برای ارزیابی دقیق زمان گیرش مواد سیمانی می‌باشد، به طوری که توجه به آن می‌تواند موجب کنترل هرچه بیشتر کیفیت بتن و پیشرفت در حوزه‌ی ساخت‌وساز گردد.
- مطالعات انجام شده بیش‌تر متمرکز بر بتن‌های پرتلندی می‌باشند و بتن‌های پوزولانی و تاثیر درصدهای مختلف افزودنی‌ها با استفاده از این تکنیک کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین تحقیقات می‌توانند به سمت بهبود الگوریتم‌های پردازش سیگنال، شامل استفاده از تکنیک‌های پیشرفته برای پردازش آن‌ها، مانند الگوریتم‌های یادگیری ماشین، جهت افزایش دقت و قابلیت اطمینان از پیش‌بینی زمان گیرش، هدایت شوند. علاوه بر این توسعه‌ی پروتکل‌ها و دستورالعمل‌های استاندارد شده، برای اندازه‌گیری‌های صورت گرفته با استفاده از تکنیک EMI، می‌تواند به ایجاد روش‌های سازگار و قابل اعتماد به منظور تعیین زمان گیرش بتن، کمک کند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که این روش باید نسبت به روش‌های سنتی موجود از نظر ارزش اقتصادی استفاده نیز، مورد ارزیابی قرار گیرد.

مراجع

- Andriopoulou, M., Roussos, E., Krupp, N., Paranicas, C., Thomsen, M., Krimigis, S., ... & Glassmeier, K. H. (2012). A noon-to-midnight electric field and nightside dynamics in Saturn's inner magnetosphere, using microsignature observations. *Icarus*, 220(2), 503-513.
- Annamdas, V. G. M., & Soh, C. K. (2010). Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: review and future issues. *Journal of Intelligent material systems and structures*, 21(1), 41-59.
- ASTM, A. (2013). Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C403/C403M-16. (2016). Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- Aydin, A. C., & Çelebi, O. (2023). Piezoelectric Materials in Civil Engineering Applications: A Review. *ACS Omega*.
- Bhalla, S. (2004). A mechanical impedance approach for structural identification, health monitoring and non-destructive evaluation using piezo-impedance transducers. Doctoral dissertation. Indian Institute of Technology Delhi.
- Bischur, E., & Schwesinger, N. (2012, September). Energy harvesting from floor using organic piezoelectric modules. In 2012 Power Engineering and Automation Conference (pp. 1-4). IEEE.
- Carino, N. J. (1997). Nondestructive test methods. In *Concrete Construction Engineering Handbook* (Vol. 1, p. 19).
- Chalioris, C. E., Providakis, C. P., Favvata, M. J., Papadopoulos, N. A., Angeli, G. M., & Karayannis, C. G. (2015). Experimental application of a wireless earthquake damage monitoring system (WiAMS) using PZT transducers in reinforced concrete beams. *WIT Trans. Built. Environ*, 152, 233-243.
- Chen, J., Qiu, Q., Han, Y., & Lau, D. (2019). Piezoelectric materials for sustainable building structures: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 14-25.
- Choi, M. H. M., Tang, Z. S., Padilla, R. V., Lim, Y. Y., & Mostafa, A. (2022, February). A study on monitoring the hydration process of glasscrete using electromechanical impedance technique. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1229, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.
- Dumoulin, C., Karaikos, G., Carette, J., Staquet, S., & Deraemaeker, A. (2012). Monitoring of the ultrasonic P-wave velocity in early-age concrete with embedded piezoelectric transducers. *Smart materials and structures*, 21(4), 047001.
- Etedali, S., Sohrabi, M. R., & Tavakoli, S. (2013). Optimal PD/PID control of smart base isolated buildings equipped with piezoelectric friction dampers. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12, 39-54.
- Fan, S., Zhao, S., Kong, Q., & Song, G. (2021). An embeddable spherical smart aggregate for monitoring concrete hydration in very early age based on electromechanical impedance method. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 32(5), 537-548.
- Ghafari, E., Yuan, Y., Wu, C., Nantung, T., & Lu, N. (2018). Evaluation the compressive strength of the cement paste blended with supplementary cementitious materials using a piezoelectric-based sensor. *Construction and Building Materials*, 171, 504-510.
- Grantham, M. G., & Bungey, J. H. (2014). Testing of concrete in structures.
- Ihn, J. B., & Chang, F. K. (2004). Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: I. Diagnostics. *Smart materials and structures*, 13(3), 609.

Jaggerwal, H., & Bajpai, Y. (2014). Assessment of characteristic compressive strength in concrete bridge girders using rebound hammer test. *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, 4(4), 2250-3005.

Ji, Y., Chen, A., Chen, Y., Han, X., Li, B., Gao, Y., ... & Xie, J. (2023). A state-of-the-art review of concrete strength detection/monitoring methods: With special emphasis on PZT transducers. *Construction and Building Materials*, 362, 129742.

Jaitanong, N., Yimnirun, R., Zeng, H. R., Li, G. (2022). Temperature and strain sensing behaviors of optical fibers and piezoelectric transducers in self-compacting concrete. *Measurement*, 194, 109779.

Jiang, D., Li, Y., Fang, X., & Hou, Z. (2014). Feasibility of lead zirconate titanate-based piezoelectric ceramic materials for smart concrete structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(1), 04014083.

Jiang, D., Li, Y., Hou, Z., & Fang, X. (2013). Effects of lead zirconate titanate-based piezoelectric ceramic transducers on the flexural behavior of concrete beams. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(14), 1662-1672.

Jiang, D., Li, Y., Wang, Z., & Fang, X. (2012). An experimental study on the impedance-based damage detection for piezoelectric smart concrete structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2(3-4), 165-175.

Jiang, D., Fang, X., & Li, Y. (2012). An experimental study on health monitoring of civil infrastructures with embedded piezoelectric transducers. In *Advanced Materials Research* (Vol. 441, pp. 84-88). Trans Tech Publications Ltd.

Kim, Y., Kim, Y., & Yun, C. B. (2012). Sensitivity enhancement of impedance-based electromechanical impedance technique for SHM of concrete structures. *Smart materials and structures*, 21(10), 105004.

Kim, Y., Kim, Y., Yun, C. B., Lee, S., & Sohn, H. (2013). Embedded sensor for monitoring the mechanical properties of concrete using impedance-based method. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(15), 1872-1884.

Kim, Y., Kim, Y., Yun, C. B., Lee, S., & Sohn, H. (2014). Cement-piezoelectric sensor for monitoring the setting process of concrete using the electromechanical impedance method. *Smart materials and structures*, 23(9), 095014.

Kim, Y., Yun, C. B., & Sohn, H. (2015). Assessment of curing effects on concrete properties using electromechanical impedance-based method. *Structural Health Monitoring*, 14(5), 472-484.

Kim, Y., Yun, C. B., & Sohn, H. (2016). Evaluation of setting and hardening of concrete structures using an impedance-based method. *Structural Health Monitoring*, 15(2), 137-148.

Li, H. N., & Chan, T. H. T. (2002). Electrical impedance measurements on cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 32(5), 849-856.

Liang, J., Jiang, T., Wang, W., & Li, Z. (2021). Monitoring and early-warning of concrete fatigue damage based on multi-parameter fiber Bragg grating sensor. *Engineering Structures*, 230, 111736.

Lin, Y., Wang, Y., & Ou, J. (2014). Monitoring of early-age concrete shrinkage and temperature using a piezoelectric transducer-based sensing system. *Measurement Science and Technology*, 25(4), 045603.

Liu, Y., & Jiang, Z. (2004). Impedance spectroscopy study of microstructure and ion migration in cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1887-1893.

Li, Z., & Yang, S. (2023). Research on cement-based piezoelectric composite materials and its application in engineering. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(2), 655-662.

Maalej, M., & Todoroki, A. (2016). Piezoelectric-Based Transducers in Early-Age Concrete Strength Monitoring: An Overview. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(2), 155-163.

- Maalej, M., Todoroki, A., & Mita, A. (2013). A study of the effects of piezoelectric ceramic transducer impedance matching on the monitoring of early-age concrete strength. *Construction and Building Materials*, 44, 472-479.
- Mansouri, I., Elahinia, M., & Assadi, A. (2014). Fatigue life prediction of epoxy-based piezoelectric composites. *Polymer Composites*, 35(6), 1209-1217.
- Mansouri, I., Elahinia, M. H., & Assadi, A. (2015). Fatigue life assessment of piezoelectric composites. *Materials Science and Engineering: A*, 628, 74-82.
- Maalej, M., Mita, A., & Todoroki, A. (2010). Effect of piezoelectric ceramic transducer impedance matching on the estimation of early-age concrete strength. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(1), 105-114.
- Maalej, M., Todoroki, A., & Mita, A. (2011). Monitoring the Strength Development of Early-Age Concrete Using a Piezoelectric-Based Impedance Transducer. *ACI Materials Journal*, 108(6).
- Madokoro, H., Takahashi, M., Mita, A., & Todoroki, A. (2008). Estimation of Concrete Strength by Electromechanical Impedance Method Using Piezoelectric Film Transducer. *ACI Structural Journal*, 105(2).
- Mangual, J., & Rodellar, J. (2015). Performance of piezoelectric transducers for dynamic testing of concrete structures. *Journal of Sound and Vibration*, 340, 82-96.
- Mangual, J. O., Mihai, A., & Rodellar, J. (2013). A simplified dynamic model of a concrete slab under vehicular traffic for piezoelectric energy harvesting. *Applied Mathematical Modelling*, 37(4), 1650-1662.
- Mansouri, I., Elahinia, M. H., & Assadi, A. (2016). Fatigue life prediction of 3-3 connectivity piezoelectric composites using continuum damage mechanics.
- Mohammadpour, M., Amini, M., & Hamouda, A. M. S. (2018). Predicting compressive strength of cement-based materials using piezoelectric transducers. *Construction and Building Materials*, 159, 181-191.
- Mohammed, A., Gupta, A., & Singh, Y. (2014). Health monitoring of concrete structures using piezoelectric-based electromechanical impedance method: A review. *Smart Materials and Structures*, 23(7), 073001.
- Müller, M., Wegener, R., & Kemper, M. (2016). Monitoring of a concrete block with a piezoelectric-based smart aggregate under quasi-static and dynamic load. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(2), 268-285.
- Mita, A., & Todoroki, A. (2012). Impedance method for monitoring the setting of fresh concrete. *ACI Materials Journal*, 109(1), 47-52.
- Niu, H., Hong, T., & Lu, J. (2020). A review of piezoelectric materials for surface acoustic wave-based structural health monitoring. *Sensors*, 20(22), 6501.
- Padilla, R. V., Choi, M. H. M., Lim, Y. Y., & Mostafa, A. (2022). Monitoring of concrete hydration using electromechanical impedance technique. *Smart Materials and Structures*, 31(3), 035035.
- Pakravan, H. R., Najafgholipour, M., Yazdanbakhsh, A., & Van Quan, N. (2014). A new method for controlling the setting time of concrete using piezoelectric transducers. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.
- Pakravan, H. R., Najafgholipour, M., Yazdanbakhsh, A., & Pourkhorshidi, A. R. (2013). Monitoring of concrete setting using piezoelectric transducers. *Journal of Sensors*, 2013.
- Pollock, H. M. (2002). Real-time monitoring of concrete strength gain using piezoelectric transducers. *ACI Materials Journal*, 99(6).

Providakis, C. P., Chalioris, C. E., Papadopoulos, N. A., Angeli, G. M., & Karayannis, C. G. (2016). Smart earthquake damage detection in concrete bridges using piezoelectric transducers. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 1(1), 1-12.

Quattrone, M., Lanza di Scalea, F., Salamone, S., & Caddemi, S. (2012). Embedded piezoelectric sensors and actuators for structural health monitoring of concrete elements: Numerical and experimental investigation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 33, 107-118.

Rivera, O., & Madenci, E. (2013). Electromechanical impedance of functionally graded piezoelectric sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(13), 1592-1600.

Sakino, K., Takeda, N., & Mihashi, H. (2011). Monitoring of material properties in concrete using piezoelectric-based electromechanical impedance method. *Cement and Concrete Research*, 41(2), 133-139.

Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R., & Czarnecki, J. J. (2003). A review of structural health monitoring literature: 1996–2001. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS.

Sohrabi, M. R., Etedali, S., & Tavakoli, S. (2013). Semi-active control of smart base isolated buildings equipped with piezoelectric friction dampers considering uncertainty. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(8), 1167-1186.

Sumitro, S., Kohno, Y., & Ochi, Y. (2010). Evaluation of poisson's ratio of concrete with embedded piezoelectric transducers based on impulse response method. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(1), 49-60.

Tang, Z. S., Choi, M. H. M., Padilla, R. V., Lim, Y. Y., & Mostafa, A. (2022). Evaluation of electromechanical impedance technique for monitoring early-age concrete structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 33(3), 417-427.